



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

Année 2025

Thèse N° 160

Intégration de l'Intelligence Artificielle en Chirurgie Viscérale

THÈSE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 13/05/2025

PAR

Mr. Aymane HAMADI

Né Le 22 Juin 1999 à Tinghir

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS

Intelligence Artificielle - Robots Chirurgicaux - Réalité Virtuelle

JURY

Mr.	A. LOUZI Professeur de Chirurgie Viscérale	PRESIDENT
Mr.	K. RABBANI Professeur de Chirurgie Viscérale	RAPPORTEUR
Mme.	M. OUALI IDRISI Professeur de Radiologie	JUGES
Mr.	M. LAHKIM Professeur de Chirurgie Viscérale	
Mr.	H. FENANE Professeur de Chirurgie Thoracique	

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إِنَّ اللَّهَ لَا يَغَيِّرُ مَا بَقِيَ حَتَّىٰ يَخِيرَ وَإِمَّا يَأْتِيَنَّكُمْ

سورة الرعد: 11

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي أَنزَلَ عَلَىكَ
الْقُرْآنَ الْعَرَبِيَّ الْمَعْرُوفَ
الْمَشْتَبِهَ لِيُذَكِّرَ الَّذِينَ
آمَنُوا بِأَنَّهُمْ كَانُوا
عِنْدَ رَبِّهِمْ يَوْمَ يُنْفَخُ
الْكَوْكَبُ إِنَّ سَعِيرًا
يُوقَدُ فِيهَا السَّجْدُ
الْمُكَذِّبِينَ

سورة البقرة ٣٢

صَدِّقَ قَوْلَ اللَّهِ الْعَظِيمِ

Serment d'Hippocrate

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

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

Je pratiquerai ma profession avec conscience et dignité.

La santé de mes malades sera mon premier but.

Je ne trahirai pas les secrets qui me seront confiés.

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

Les médecins seront mes frères.

Aucune considération de religion, de nationalité, de race,

*Aucune considération politique et sociale, ne s'interposera entre mon devoir
et mon patient.*

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

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

Je m'y engage librement et sur mon honneur.

Déclaration Genève, 1948



*LISTE DES
PROFESSEURS*



UNIVERSITE CADI AYYAD
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
MARRAKECH

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

ADMINISTRATION

Doyen : Pr. Said ZOUHAIR
Vice doyen de la Recherche et la Coopération : Pr. Mohamed AMINE
Vice doyen des Affaires Pédagogiques : Pr. Redouane EL FEZZAZI
Vice doyen Chargé de la Pharmacie : Pr. Oualid ZIRAOUI
Secrétaire Générale : Mr. Azzeddine EL HOUDAIGUI

LISTE NOMINATIVE DU PERSONNEL ENSEIGNANTS CHERCHEURS PERMANANT

N°	Nom et Prénom	Cadre	Spécialités
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	AMINE Mohamed	P.E.S	Epidémiologie clinique
36	EL ADIB Ahmed Rhassane	P.E.S	Anesthésie-réanimation
37	ADMOU Brahim	P.E.S	Immunologie
38	CHERIF IDRISSE EL GANOUNI Najat	P.E.S	Radiologie
39	ARSALANE Lamiae	P.E.S	Microbiologie-virologie
40	BOUKHIRA Abderrahman	P.E.S	Biochimie-chimie
41	TASSI Noura	P.E.S	Maladies infectieuses
42	MANOUDI Fatiha	P.E.S	Psychiatrie
43	BOURROUS Monir	P.E.S	Pédiatrie

44	NEJMI Hicham	P.E.S	Anesthésie-réanimation
45	LAOUAD Inass	P.E.S	Néphrologie
46	EL HOUDZI Jamila	P.E.S	Pédiatrie
47	FOURAJI Karima	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
48	KHALLOUKI Mohammed	P.E.S	Anesthésie-réanimation
49	BSISS Mohammed Aziz	P.E.S	Biophysique
50	EL OMRANI Abdelhamid	P.E.S	Radiothérapie
51	SORAA Nabila	P.E.S	Microbiologie-virologie
52	KHOUCHANI Mouna	P.E.S	Radiothérapie
53	JALAL Hicham	P.E.S	Radiologie
54	EL ANSARI Nawal	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
55	AMRO Lamyae	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
56	OUALI IDRISSI Mariem	P.E.S	Radiologie
57	RABBANI Khalid	P.E.S	Chirurgie générale
58	EL BOUCHTI Imane	P.E.S	Rhumatologie
59	EL BOUIHI Mohamed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
60	ABOU EL HASSAN Taoufik	P.E.S	Anesthésie-réanimation
61	QAMOUSS Youssef	P.E.S	Anesthésie réanimation
62	ZYANI Mohammad	P.E.S	Médecine interne
63	QACIF Hassan	P.E.S	Médecine interne
64	BEN DRISS Laila	P.E.S	Cardiologie
65	ABOUSSAIR Nistrine	P.E.S	Génétique
66	LAKMICHI Mohamed Amine	P.E.S	Urologie
67	HOCAR Ouafa	P.E.S	Dermatologie
68	EL KARIMI Saloua	P.E.S	Cardiologie
69	SAMLANI Zouhour	P.E.S	Gastro-entérologie
70	AGHOUTANE El Mouhtadi	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
71	ABOUCHADI Abdeljalil	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
72	KRIET Mohamed	P.E.S	Ophtalmologie

73	RAIS Hanane	P.E.S	Anatomie Pathologique
74	TAZI Mohamed Ilias	P.E.S	Hématologie clinique
75	EL MGHARI TABIB Ghizlane	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
76	DRAISS Ghizlane	P.E.S	Pédiatrie
77	EL IDRISSE SLITINE Nadia	P.E.S	Pédiatrie
78	BOURRAHOUE Aicha	P.E.S	Pédiatrie
79	ZAHLANE Kawtar	P.E.S	Microbiologie- virologie
80	BOUKHANNI Lahcen	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
81	HACHIMI Abdelhamid	P.E.S	Réanimation médicale
82	LOUHAB Nisrine	P.E.S	Neurologie
83	ZAHLANE Mouna	P.E.S	Médecine interne
84	BENJILALI Laila	P.E.S	Médecine interne
85	NARJIS Youssef	P.E.S	Chirurgie générale
86	HAJJI Ibtissam	P.E.S	Ophtalmologie
87	LAGHMARI Mehdi	P.E.S	Neurochirurgie
88	BENCHAMKHA Yassine	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
89	CHAFIK Rachid	P.E.S	Traumato-orthopédie
90	EL HAOURY Hanane	P.E.S	Traumato-orthopédie
91	ABKARI Imad	P.E.S	Traumato-orthopédie
92	MOUFID Kamal	P.E.S	Urologie
93	EL BARNI Rachid	P.E.S	Chirurgie générale
94	BOUCHENTOUF Rachid	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
95	BASRAOUI Dounia	P.E.S	Radiologie
96	BELKHOUE Ahlam	P.E.S	Rhumatologie
97	ZAOUI Sanaa	P.E.S	Pharmacologie
98	MSOUGAR Yassine	P.E.S	Chirurgie thoracique
99	RADA Noureddine	P.E.S	Pédiatrie
100	MOUAFFAK Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
101	ZIADI Amra	P.E.S	Anesthésie-réanimation

102	ANIBA Khalid	P.E.S	Neurochirurgie
103	ROCHDI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
104	FADILI Wafaa	P.E.S	Néphrologie
105	ADALI Imane	P.E.S	Psychiatrie
106	HAROU Karam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
107	BASSIR Ahlam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
108	FAKHIR Bouchra	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
109	BENHIMA Mohamed Amine	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
110	EL KHAYARI Mina	P.E.S	Réanimation médicale
111	AISSAOUI Younes	P.E.S	Anesthésie-réanimation
112	BAIZRI Hicham	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
113	ATMANE El Mehdi	P.E.S	Radiologie
114	EL AMRANI Moulay Driss	P.E.S	Anatomie
115	BELBARAKA Rhizlane	P.E.S	Oncologie médicale
116	ALJ Soumaya	P.E.S	Radiologie
117	OUBAHA Sofia	P.E.S	Physiologie
118	EL HAOUATI Rachid	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
119	BENALI Abdeslam	P.E.S	Psychiatrie
120	MLIHA TOUATI Mohammed	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
121	MARGAD Omar	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
122	KADDOURI Said	P.E.S	Médecine interne
123	ZEMRAOUI Nadir	P.E.S	Néphrologie
124	EL KHADER Ahmed	P.E.S	Chirurgie générale
125	DAROUASSI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
126	BENJELLOUN HARZIMI Amine	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
127	FAKHRI Anass	P.E.S	Histologie-embryologie cytogénétique
128	SALAMA Tarik	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
129	CHRAA Mohamed	P.E.S	Physiologie
130	ZARROUKI Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation

131	AIT BATAHAR Salma	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
132	ADARMOUCH Latifa	P.E.S	Médecine communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)
133	BELBACHIR Anass	P.E.S	Anatomie pathologique
134	HAZMIRI Fatima Ezzahra	P.E.S	Histologie-embryologie cytogénétique
135	EL KAMOUNI Youssef	P.E.S	Microbiologie-virologie
136	SERGHINI Issam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
137	EL MEZOUARI El Mostafa	P.E.S	Parasitologie mycologie
138	ABIR Badreddine	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
139	GHAZI Mirieme	P.E.S	Rhumatologie
140	ZIDANE Moulay Abdelfettah	P.E.S	Chirurgie thoracique
141	LAHKIM Mohammed	P.E.S	Chirurgie générale
142	MOUHSINE Abdelilah	P.E.S	Radiologie
143	TOURABI Khalid	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
144	BELHADJ Ayoub	P.E.S	Anesthésie-réanimation
145	BOUZERDA Abdelmajid	P.E.S	Cardiologie
146	ARABI Hafid	P.E.S	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
147	ABDELFETTAH Youness	P.E.S	Rééducation et réhabilitation fonctionnelle
148	REBAHI Houssam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
149	BENNAOUI Fatiha	P.E.S	Pédiatrie
150	ZOUIZRA Zahira	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
151	SEDDIKI Rachid	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
152	SEBBANI Majda	Pr Ag	Médecine Communautaire (Médecine préventive, santé publique et hygiène)
153	ABDOU Abdessamad	Pr Ag	Chirurgie Cardio-vasculaire
154	HAMMOUNE Nabil	Pr Ag	Radiologie
155	ESSADI Ismail	Pr Ag	Oncologie médicale
156	ALJALIL Abdelfattah	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
157	LAFFINTI Mahmoud Amine	Pr Ag	Psychiatrie

158	RHARRASSI Issam	Pr Ag	Anatomie–patologique
159	ASSERRAJI Mohammed	Pr Ag	Néphrologie
160	JANAH Hicham	Pr Ag	Pneumo–phtisiologie
161	NASSIM SABAH Taoufik	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
162	ELBAZ Meriem	Pr Ag	Pédiatrie
163	BELGHMAIDI Sarah	Pr Ag	Ophtalmologie
164	FENANE Hicham	Pr Ag	Chirurgie thoracique
165	GEBRATI Lhoucine	MC Hab	Chimie
166	FDIL Naima	MC Hab	Chimie de coordination bio–organique
167	LOQMAN Souad	MC Hab	Microbiologie et toxicologie environnementale
168	BAALLAL Hassan	Pr Ag	Neurochirurgie
169	BELFQUIH Hatim	Pr Ag	Neurochirurgie
170	AKKA Rachid	Pr Ag	Gastro–entérologie
171	BABA Hicham	Pr Ag	Chirurgie générale
172	MAOUJOURD Omar	Pr Ag	Néphrologie
173	SIRBOU Rachid	Pr Ag	Médecine d'urgence et de catastrophe
174	EL FILALI Oualid	Pr Ag	Chirurgie Vasculaire périphérique
175	EL– AKHIRI Mohammed	Pr Ag	Oto–rhino–laryngologie
176	HAJJI Fouad	Pr Ag	Urologie
177	OUMERZOUK Jawad	Pr Ag	Neurologie
178	JALLAL Hamid	Pr Ag	Cardiologie
179	ZBITOU Mohamed Anas	Pr Ag	Cardiologie
180	RAISSI Abderrahim	Pr Ag	Hématologie clinique
181	BELLASRI Salah	Pr Ag	Radiologie
182	DAMI Abdallah	Pr Ag	Médecine Légale
183	AZIZ Zakaria	Pr Ag	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
184	ELOUARDI Youssef	Pr Ag	Anesthésie–réanimation
185	LAHLIMI Fatima Ezzahra	Pr Ag	Hématologie clinique

186	EL FAKIRI Karima	Pr Ag	Pédiatrie
187	NASSIH Houda	Pr Ag	Pédiatrie
188	LAHMINI Widad	Pr Ag	Pédiatrie
189	BENANTAR Lamia	Pr Ag	Neurochirurgie
190	EL FADLI Mohammed	Pr Ag	Oncologie médicale
191	AIT ERRAMI Adil	Pr Ag	Gastro-entérologie
192	CHETTATI Mariam	Pr Ag	Néphrologie
193	SAYAGH Sanae	Pr Ag	Hématologie
194	BOUTAKIOUTE Badr	Pr Ag	Radiologie
195	CHAHBI Zakaria	Pr Ag	Maladies infectieuses
196	ACHKOUN Abdessalam	Pr Ag	Anatomie
197	DARFAOUI Mouna	Pr Ag	Radiothérapie
198	EL-QADIRY Rabiyy	Pr Ag	Pédiatrie
199	ELJAMILI Mohammed	Pr Ag	Cardiologie
200	HAMRI Asma	Pr Ag	Chirurgie Générale
201	EL HAKKOUNI Awatif	Pr Ag	Parasitologie mycologie
202	ELATIQUI Oumkeltoum	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
203	BENZALIM Meriam	Pr Ag	Radiologie
204	ABOULMAKARIM Siham	Pr Ag	Biochimie
205	LAMRANI HANCHI Asmae	Pr Ag	Microbiologie-virologie
206	HAJHOUI Farouk	Pr Ag	Neurochirurgie
207	EL KHASSOUI Amine	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
208	MEFTAH Azzelarab	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
209	AABBASSI Bouchra	MC	Pédopsychiatrie
210	DOUIREK Fouzia	MC	Anesthésie-réanimation
211	SAHRAOUI Houssam Eddine	MC	Anesthésie-réanimation
212	RHEZALI Manal	MC	Anesthésie-réanimation
213	ABALLA Najoua	MC	Chirurgie pédiatrique
214	MOUGUI Ahmed	MC	Rhumatologie

215	ZOUITA Btissam	MC	Radiologie
216	HAZIME Raja	MC	Immunologie
217	SALLAHI Hicham	MC	Traumatologie-orthopédie
218	BENCHAFAI Ilias	MC	Oto-rhino-laryngologie
219	EL JADI Hamza	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
220	AZAMI Mohamed Amine	MC	Anatomie pathologique
221	FASSI Fihri Mohamed jawad	MC	Chirurgie générale
222	BELARBI Marouane	MC	Néphrologie
223	AMINE Abdellah	MC	Cardiologie
224	CHETOUI Abdelkhalek	MC	Cardiologie
225	WARDA Karima	MC	Microbiologie
226	EL AMIRI My Ahmed	MC	Chimie de Coordination bio-organique
227	ROUKHSI Redouane	MC	Radiologie
228	ARROB Adil	MC	Chirurgie réparatrice et plastique
229	SBAAI Mohammed	MC	Parasitologie-mycologie
230	SLIOUI Badr	MC	Radiologie
231	SBAI Asma	MC	Informatique
232	CHEGGOUR Mouna	MC	Biochimie
233	MOULINE Souhail	MC	Microbiologie-virologie
234	AZIZI Mounia	MC	Néphrologie
235	BOUHAMIDI Ahmed	MC	Dermatologie
236	YANISSE Siham	MC	Pharmacie galénique
237	DOULHOUSNE Hassan	MC	Radiologie
238	KHALLIKANE Said	MC	Anesthésie-réanimation
239	BENAMEUR Yassir	MC	Médecine nucléaire
240	ZIRAOUI Oualid	MC	Chimie thérapeutique
241	IDALENE Malika	MC	Maladies infectieuses
242	LACHHAB Zineb	MC	Pharmacognosie
243	ABOUDOURIB Maryem	MC	Dermatologie

244	AHBALA Tariq	MC	Chirurgie générale
245	LALAOUI Abdessamad	MC	Pédiatrie
246	ESSAFTI Meryem	MC	Anesthésie-réanimation
247	RACHIDI Hind	MC	Anatomie pathologique
248	FIKRI Oussama	MC	Pneumo-phtisiologie
249	EL HAMDAOUI Omar	MC	Toxicologie
250	EL HAJJAMI Ayoub	MC	Radiologie
251	BOUMEDIANE El Mehdi	MC	Traumato-orthopédie
252	RAFI Sana	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
253	JEBRANE Ilham	MC	Pharmacologie
254	LAKHDAR Youssef	MC	Oto-rhino-laryngologie
255	LGHABI Majida	MC	Médecine du Travail
256	AIT LHAJ El Houssaine	MC	Ophtalmologie
257	RAMRAOUI Mohammed-Es-said	MC	Chirurgie générale
258	EL MOUHAFID Faisal	MC	Chirurgie générale
259	AHMANNA Hussein-choukri	MC	Radiologie
260	AIT M'BAREK Yassine	MC	Neurochirurgie
261	ELMASRIOUI Joumana	MC	Physiologie
262	FOURA Salma	MC	Chirurgie pédiatrique
263	LASRI Najat	MC	Hématologie clinique
264	BOUKTIB Youssef	MC	Radiologie
265	MOUROUTH Hanane	MC	Anesthésie-réanimation
266	BOUZID Fatima zahrae	MC	Génétique
267	MRHAR Soumia	MC	Pédiatrie
268	QUIDDI Wafa	MC	Hématologie
269	BEN HOUMICH Taoufik	MC	Microbiologie-virologie
270	FETOUI Imane	MC	Pédiatrie
271	FATH EL KHIR Yassine	MC	Traumato-orthopédie
272	NASSIRI Mohamed	MC	Traumato-orthopédie

273	AIT-DRISS Wiam	MC	Maladies infectieuses
274	AIT YAHYA Abdelkarim	MC	Cardiologie
275	DIANI Abdelwahed	MC	Radiologie
276	AIT BELAID Wafae	MC	Chirurgie générale
277	ZTATI Mohamed	MC	Cardiologie
278	HAMOUCHE Nabil	MC	Néphrologie
279	ELMARDOULI Mouhcine	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
280	BENNIS Lamiae	MC	Anesthésie-réanimation
281	BENDAOUZ Layla	MC	Dermatologie
282	HABBAB Adil	MC	Chirurgie générale
283	CHATAR Achraf	MC	Urologie
284	OUMGHAR Nezha	MC	Biophysique
285	HOUMAID Hanane	MC	Gynécologie-obstétrique
286	YOUSFI Jaouad	MC	Gériatrie
287	NACIR Oussama	MC	Gastro-entérologie
288	BABACHEIKH Safia	MC	Gynécologie-obstétrique
289	ABDOURAFIQ Hasna	MC	Anatomie
290	TAMOUR Hicham	MC	Anatomie
291	IRAQI HOUSSAINI Kawtar	MC	Gynécologie-obstétrique
292	EL FAHIRI Fatima Zahrae	MC	Psychiatrie
293	BOUKIND Samira	MC	Anatomie
294	LOUKHNATI Mehdi	MC	Hématologie clinique
295	ZAHROU Farid	MC	Neurochirurgie
296	MAAROUFI Fathillah Elkarim	MC	Chirurgie générale
297	EL MOUSSAOUI Soufiane	MC	Pédiatrie
298	BARKICHE Samir	MC	Radiothérapie
299	ABI EL AALA Khalid	MC	Pédiatrie
300	AFANI Leila	MC	Oncologie médicale
301	EL MOULOUA Ahmed	MC	Chirurgie pédiatrique

302	LAGRINE Mariam	MC	Pédiatrie
303	OULGHOUL Omar	MC	Oto-rhino-laryngologie
304	AMOCH Abdelaziz	MC	Urologie
305	ZAHLAN Safaa	MC	Neurologie
306	EL MAHFOUDI Aziz	MC	Gynécologie-obstétrique
307	CHEHBOUNI Mohamed	MC	Oto-rhino-laryngologie
308	LAIRANI Fatima ezzahra	MC	Gastro-entérologie
309	SAADI Khadija	MC	Pédiatrie
310	DAFIR Kenza	MC	Génétique
311	CHERKAOUI RHAZOUANI Oussama	MC	Neurologie
312	ABAINOU Lahoussaine	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
313	BENCHANNA Rachid	MC	Pneumo-phtisiologie
314	TITOU Hicham	MC	Dermatologie
315	EL GHOUL Naoufal	MC	Traumato-orthopédie
316	BAHI Mohammed	MC	Anesthésie-réanimation
317	RAITEB Mohammed	MC	Maladies infectieuses
318	DREF Maria	MC	Anatomie pathologique
319	ENNACIRI Zainab	MC	Psychiatrie
320	BOUSSAIDANE Mohammed	MC	Traumato-orthopédie
321	JENDOUI Omar	MC	Urologie
322	MANSOURI Maria	MC	Génétique
323	ERRIFAIY Hayate	MC	Anesthésie-réanimation
324	BOUKOUB Naila	MC	Anesthésie-réanimation
325	OUACHAOU Jamal	MC	Anesthésie-réanimation
326	EL FARGANI Rania	MC	Maladies infectieuses
327	IJIM Mohamed	MC	Pneumo-phtisiologie
328	AKANOUR Adil	MC	Psychiatrie
329	ELHANAFI Fatima Ezzohra	MC	Pédiatrie
330	MERBOUH Manal	MC	Anesthésie-réanimation

331	BOUROUMANE Mohamed Rida	MC	Anatomie
332	IJDDA Sara	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
333	GHARBI Khalid	MC	Gastro-entérologie
334	ATBIB Yassine	MC	Pharmacie clinique
335	EL GUAZZAR Ahmed (Militaire)	MC	Chirurgie générale
336	HENDY Iliass	MC	Cardiologie
337	MOURAFIQ Omar	MC	Traumato-orthopédie
338	ZAIZI Abderrahim	MC	Traumato-orthopédie
339	HATTAB Mohamed Salah Koussay	MC	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
340	DEBBAGH Fayrouz	MC	Microbiologie-virologie
341	OUASSIL Sara	MC	Radiologie
342	KOUYED Aicha	MC	Pédopsychiatrie
343	DRIOUICH Aicha	MC	Anesthésie-réanimation
344	TOURAIF Mariem	MC	Chirurgie pédiatrique
345	BENNAOUI Yassine	MC	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
346	SABIR Es-said	MC	Chimie bio organique clinique
347	IBBA Mouhsin	MC	Chirurgie thoracique
348	LAATITIOUI Sana	MC	Radiothérapie
349	SAADOUNE Mohamed	MC	Radiothérapie
350	TLEMCANI Younes	MC	Ophtalmologie
351	SOLEH Abdelwahed	MC	Traumato-orthopédie
352	OUALHADJ Hamza	MC	Immunologie
353	BERGHALOUT Mohamed	MC	Psychiatrie
354	EL BARAKA Soumaya	MC	Chimie analytique-bromatologie
355	KARROUMI Saadia	MC	Psychiatrie
356	ZOUITEN Othmane	MC	Oncologie médicale
357	EL-OUAKHOUMI Amal	MC	Médecine interne
358	AJMANI Fatima	MC	Médecine légale
359	MENJEL Imane	MC	Pédiatrie

360	BOUCHKARA Wafae	MC	Gynécologie–obstétrique
361	ASSEM Oualid	MC	Pédiatrie
362	ELHANAFI Asma	MC	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
363	ABDELKHALKI Mohamed Hicham	MC	Gynécologie–obstétrique
364	ELKASSEH Mostapha	MC	Traumato–orthopédie
365	EL OUAZZANI Meryem	MC	Anatomie pathologique
366	HABBAB Mohamed	MC	Traumato–orthopédie
367	KHAMLIJ Aimad Ahmed	MC	Anesthésie–réanimation
368	EL KHADRAOUI Halima	MC	Histologie–embryologie–cyto–génétique
369	ELKHETTAB Fatimazahra	MC	Anesthésie–réanimation
370	SIDAYNE Mohammed	MC	Anesthésie–réanimation
371	ZAKARIA Yasmina	MC	Neurologie
372	BOUKAIDI Yassine	MC	Chirurgie Cardio–vasculaire

LISTE ARRETEE LE 03 / 02 /2025



DEDICACES



*C'est avec une immense reconnaissance que
je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les
personnes qui ont croisé mon chemin et m'ont soutenu
tout au long de ce parcours.*

*Leur présence, leurs encouragements, leur amour et
leur soutien constant ont été des forces qui m'ont
permis de surmonter chaque obstacle et de rester
déterminé à atteindre mon objectif.*

*À toutes ces âmes bienveillantes, qui par leur lumière
ont éclairé mes jours sombres,*

Je dédie cette thèse.

اللَّهُ

اللهم لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك. اللهم اجعلنا من الذين
لا ينسون نعمك، ويشكرووك على كل ما أنعمت به علينا، ظاهراً وباطناً.
اللهم اجعلنا من عبادك الصابرين الشاكرين، واغفر لنا ولآبائنا ولأمهاتنا
ولمن لهم حق علينا، واجعلنا من أهل الجنة برحمتك يا أرحم الراحمين.

À la mémoire de ma Tante, Kaïda HAMADI,

À toi, ma chère tante, pilier de notre famille, lumière éclatante de mon enfance et source inépuisable d'amour et de générosité.

Tu as toujours été bien plus qu'une simple tante ; tu as incarné une seconde mère, un guide attentif, un repère inébranlable.

Depuis mon plus jeune âge, tu m'as enveloppé de ton amour sans faille, de ta douceur infinie et de ton soutien constant. Ta présence rassurante m'a offert la sérénité nécessaire pour grandir, tandis que ta force discrète m'a accompagné tout au long de mon parcours.

D'une bonté sans bornes, tu étais toujours là, prête à tendre la main, à reconforter, à encourager, faisant preuve d'une générosité exemplaire.

Tu étais le cœur battant de notre famille, celle qui rassemblait, insufflait équilibre et harmonie. Grâce à toi, nous avons appris la vraie valeur du partage, de l'affection sincère et du dévouement.

Aujourd'hui, avec une profonde gratitude et une émotion immense, je te dédie ce travail en hommage à tout ce que tu m'as transmis. Tu as semé autour de toi des graines de bienveillance qui continueront de fleurir dans nos cœurs.

Que Dieu, dans Sa miséricorde infinie, t'accueille en Son éternel paradis, t'entoure de paix et te récompense pour tout le bien que tu as répandu sur cette terre.

Ta lumière ne s'éteindra jamais. Elle brillera à travers nous, guidant nos pas et illuminant nos vies.

Tu resteras à jamais gravée dans mon cœur, dans celui de tous ceux qui ont eu le privilège de croiser ta route, et au sein même de notre famille, où ton empreinte demeure impérissable.

À la mémoire de mes Tantes Aïcha et Izzî HAMADI,
et mes Oncles Lhoussaine et Mohamed HAMADI,

Vous avez toujours occupé une place précieuse dans mes pensées, et c'est avec une profonde émotion que je vous dédie ce travail.

Que Dieu, le Miséricordieux, vous accueille dans Son éternel paradis.

À la mémoire de ma Grande- mère Paternelle, Fatima OUHAMI,

Bien que ton absence remonte à mon enfance, ton influence et ton amour restent gravés en nous. Tu étais le pilier de notre famille, le gardien silencieux qui veillait avec une tendresse infinie.

Par ta sagesse, tu as insufflé en nous la résilience ; par ta douceur, tu as renforcé l'unité qui nous lie encore aujourd'hui.

Ton absence laisse un sillage de nostalgie, mais l'empreinte lumineuse de ton héritage continue d'éclairer notre chemin.

Ce travail est une offrande à ta mémoire, un murmure d'amour qui défie le temps. Que Dieu t'accueille dans Son infinie clémence et t'accorde le repos éternel.

À la mémoire de mon Grand-père Maternel, Ali KOMMIR,

L'homme de principes et de vision.

Tu étais un homme dont la sagesse et la sérénité imprégnaient chaque moment passé à tes côtés. Par ta patience et ta constance, tu savais guider ceux qui t'entouraient, toujours avec une douceur discrète mais puissante.

Tu n'avais pas besoin de grandes paroles pour transmettre ton amour et tes valeurs, tu le faisais simplement par tes actions, par ta manière d'être, toujours présente, toujours rassurante.

Tu nous as appris que l'investissement, sous toutes ses formes, est l'une des compétences les plus précieuses à cultiver, et que l'entrepreneuriat n'est pas simplement une activité, mais un véritable art et un état d'esprit.

L'art de voir les opportunités, d'agir avec audace et de persévérer, même quand les défis semblent insurmontables.

Ce travail est dédié à toi, en hommage à l'impact profond et silencieux que tu as eu sur nous. Que Dieu t'accueille dans Sa miséricorde infinie et t'accorde la paix et le repos éternels.

À toi, ma chère Maman, Saïda KOMMIR,

La lumière qui a guidé chacun de mes pas et la force silencieuse mais indomptable qui a construit les fondations de ma vie.

C'est avec une émotion profonde et une gratitude sans fin que je dédie cette thèse à la femme extraordinaire qui m'a donné la vie, et qui, chaque jour, a été la source de mon inspiration et de mon courage : toi, ma mère.

Ton amour inaltérable et ta sagesse infinie ont été les fondations solides sur lesquelles j'ai construit chaque pas de mon parcours.

Cette thèse n'est pas simplement le reflet de mon travail académique, mais bien celui de l'éducation que tu m'as donnée, des valeurs que tu m'as transmises, et de la confiance que tu as toujours placée en moi.

Tout au long de ma vie, tu as été bien plus qu'une mère.

Tu as été le socle sur lequel je me suis appuyé, le guide lumineux dans mes moments d'incertitude, et la personne qui m'a appris à me relever et à avancer.

Grâce à toi, j'ai compris que le véritable succès ne réside pas dans les récompenses extérieures, mais dans l'amour et l'engagement que l'on met dans chaque action.

En te dédiant ce travail, je souhaite te rendre hommage pour tout ce que tu as sacrifiée, pour la force tranquille que tu as toujours déployée pour nous, et pour l'amour infini que tu m'as donné.

Que ces mots soient l'expression d'une gratitude éternelle et d'un amour qui ne cessera jamais de grandir.

Que Dieu, le Tout-Puissant, te garde en bonne santé, t'accorde une vie longue et pleine de bonheur, et que tu sois à jamais l'étoile qui guide mes pas et éclaire mon chemin.

Avec tout l'amour et la reconnaissance infinie que j'ai pour toi, maman.

À toi, mon cher Papa, Youssef HAMADI,

L'infatigable combattant, le père exemplaire, l'homme de valeurs
et de sagesse.

Tu as été, tout au long de ma vie, non seulement un père exemplaire, mais aussi un ami fidèle et un conseiller sage. Chaque geste, chaque parole, a marqué mon cœur et a forgé l'homme que je suis aujourd'hui. Grâce à toi, j'ai appris à affronter la vie avec dignité, courage et honneur.

Tu as toujours incarné la force, affrontant chaque défi avec une détermination sans faille, transformant chaque difficulté en une leçon précieuse. Depuis mon enfance, tu m'as appris que la vie n'est pas un chemin facile, mais un voyage semé d'embûches, où chaque obstacle devient une opportunité de grandir.

Ton amour pour la science, ta quête de la vérité et ton engagement envers l'éducation ont éclairé mon parcours et façonné ma vision du monde.

Tu incarnes l'idéal d'un homme cultivé et respecté, et c'est grâce à toi que j'ai appris à explorer sans relâche, à remettre en question, et à ne jamais me contenter de l'évidence.

Cette thèse n'est pas simplement un travail académique, elle est le fruit d'un chemin que tu as largement contribué à tracer.

Chaque page, chaque idée, porte l'empreinte de tes enseignements et de ton engagement envers la connaissance. Bien que les mots ne suffisent pas à exprimer l'étendue de ma gratitude.

À travers cette thèse, j'espère modestement te rendre un peu de l'amour et des sacrifices que tu as consentis pour me permettre d'être ici aujourd'hui.

Que Dieu, le Tout-Puissant, te garde en bonne santé, t'accorde une vie longue et remplie de bonheur, et que tu sois à jamais la lumière qui éclaire mon chemin.

À toi, mon cher Frère, Youness HAMADI (Zouz),

Symbole de discipline et de persévérance,

Depuis notre enfance, chaque moment partagé est gravé dans mon cœur comme un souvenir précieux. Nos rires, nos jeux, nos petites querelles, tout cela forme une toile d'émotions et de souvenirs qui n'ont cessé de m'accompagner.

Tu as toujours incarné la rigueur et la résilience, avançant discrètement, mais avec une détermination sans faille. Tu m'as appris que l'effort quotidien est la clé de la réussite, et que la véritable force réside dans l'engagement silencieux.

Ton parcours, fruit de ton travail acharné, est une source d'inspiration. Par ton exemple, tu m'as montré qu'aucun rêve n'est trop grand lorsque l'on persévère avec passion.

Je te dédie ce travail, en te souhaitant un avenir brillant, rempli de bonheur et de succès. Que Dieu nous garde unis, toujours entourés de tendresse, de joie et de prospérité. Ce travail est le reflet de toutes ces années d'effort et de soutien mutuel.

À toi, mon Petit frère, Mohamed HAMADI,

L'inventeur et l'esprit créatif,

Depuis tes débuts, tu as toujours eu cette capacité unique à voir le monde différemment, à transformer chaque idée en quelque chose de nouveau.

Ta créativité, sans limites, se reflète dans ta passion, où tu repousses constamment tes frontières et incarnes la persévérance ainsi que l'engagement.

Avec toute ma gratitude, je dédie ce travail à ton esprit inventif et à l'inspiration que tu apportes à ceux qui ont la chance de te connaître. Que ta soif de créer et de dépasser les limites de l'imaginaire continue de guider tes pas vers de nouvelles découvertes et réussites.

À la Famille, Boutaglay,

Si Mohamed, Asmae, Mahmoud, Ayoub, Leyla et le petit Abderrahmane,

Je tiens à vous adresser un immense merci. Vous avez été une source de soutien inestimable tout au long de mon parcours. Loin de ma famille, vous avez su être ma seconde famille, toujours présente avec votre amour, votre générosité et votre bienveillance.

Vous m'avez offert un espace de sérénité et une force qui m'ont permis de poursuivre mes études dans la tranquillité, même lors des moments les plus difficiles. Votre accueil et votre soutien constants m'ont permis de grandir et de m'épanouir. Je suis profondément reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Que ce travail soit un modeste témoignage de mes sentiments les plus sincères et les plus affectueux envers vous.

Que Dieu vous accorde bonheur, prospérité et bénédictions infinies.

À toi, mon cher Ami, Achraf KABOURI,

Depuis toutes ces années, tu n'as pas été un simple ami, tu es devenu un frère, un guide et un pilier sur lequel je peux toujours compter.

À travers nos moments partagés, nos idées échangées, nos discussions profondes (et parfois naïves !), tu m'as prouvé que l'amitié authentique se nourrit de petites attentions et de grands échanges.

Je n'oublierai jamais cette pièce de 200, symbolisant le fameux principe « pour éviter la pauvreté ». Elle m'a toujours fait sourire, non seulement parce qu'elle était une petite blague, mais aussi parce qu'elle incarnait un rappel simple et profond : la vie, dans son essence, est parfois plus simple qu'on ne le croit.

Merci pour ta présence constante et pour tout ce que tu as apporté à ma vie. Ce travail est une modeste dédicace à notre amitié et à tous les souvenirs inoubliables que nous avons créés ensemble.

À toi, ma chère Amie, Amína El Ouarguí,

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer la gratitude que je ressens à ton égard. Depuis le début, tu as été une présence précieuse et rassurante, apportant à chaque étape de mon parcours un soutien sincère, une écoute attentive et une sagesse dont je n'aurais pas pu me passer.

Ta capacité à illuminer mes moments de doute avec des conseils pleins de clarté et de bienveillance a été un véritable cadeau. Tu as su m'aider à trouver la force d'avancer et à voir les défis sous un angle plus constructif.

Ce travail est un petit hommage à l'impact que tu as eu sur ma vie, un témoignage de la place que tu occupes.

Tu as été bien plus qu'une simple amie, mais une véritable compagne de route, dont la présence et l'amitié ont enrichi mon parcours à un point que les mots peinent à décrire.

Je te souhaite une vie remplie de bonheur, de réussites et de moments de joie, à la hauteur de la générosité que tu as partagée avec moi.

À mes chers Compagnons de ce long voyage,

Chadi HAKKI, Loay HAOUARIA, Mouad HAIR, Zakaria KHALDOUN,
Ayoub HANNIOUI, Kenza HAMMADI, Mohamed KERROUMI
et AYOUB HAOUFADI,

À vous, mes chers collègues de ce long parcours médical, du début à la fin, votre présence a été un socle irremplaçable.

Merci pour votre soutien indéfectible, nos moments de complicité et les souvenirs inoubliables que nous avons créés ensemble.

Chaque étape, chaque défi a été plus facile à affronter grâce à vous. Ce succès vous appartient autant qu'à moi, et je suis honoré d'avoir partagé cette aventure à vos côtés.

À vous, mes Amis Entrepreneurs,

Mouad KOMMIR, Hassan HAKAM,

Mustapha ZGUIT, Issam EL BAYED et Mohamed OUHAMMI,

Votre partage de défis et de succès a été un enrichissement inestimable, élargissant mes horizons bien au-delà de la médecine.

Vos conseils avisés et votre vision stratégique ont redéfini mes objectifs, mes rêves, et ont renforcé mon état d'esprit. Ils continuent de façonner ma trajectoire médicale.

L'entrepreneuriat, tel que vous le portez, dépasse le cadre économique : il devient une manière de penser sa vie, de prendre en main son destin, et d'oser créer ce qui n'existe pas encore. C'est une posture de courage et d'action. Ce travail est un témoignage sincère de ma profonde gratitude.

À toi, mon Grand Frère, Hamid DANI,

Le Meilleur Géologue au Monde

Je tiens à te remercier du fond du cœur pour ton soutien indéfectible depuis le jour 1.

Dans cette chambre modeste, entre rires et galères partagées, tu as été bien plus qu'un simple ami : un grand frère, un guide qui m'a soutenu et enseigné les vraies valeurs et principes de la vie.

Ton support discret mais constant a façonné bien plus que mes journées, il a forgé mon caractère, mon courage et mon espoir.

Je n'oublierai jamais cet héritage précieux d'amitié et de sagesse que tu m'as offert, un trésor que le temps ne pourra jamais effacer.

À vous, mon Ami, Yassine DORAMAN,

Je tiens à te remercier du fond du cœur pour ton soutien constant et ta disponibilité sans limite. Tu as toujours été là, prêt à écouter, conseiller, et m'épauler sans jamais hésiter.

Ta présence rassurante et ta générosité font toute la différence et je me sens vraiment chanceux de pouvoir compter sur un ami aussi fidèle et bienveillant que toi.

Ce travail est un témoignage sincère de ma profonde gratitude.

À vous, Dr Amine El MANSOURI et Dr Ayoub KAZZA,

Résidents du service de Chirurgie viscérale - CHU Mohammed VI

Je tiens à vous exprimer ma sincère gratitude pour votre aide précieuse, votre disponibilité constante et votre grande serviabilité.

À vous, Badraddine et Amina,

Personnels du service de Chirurgie viscérale - CHU Mohammed VI

Je tiens à vous exprimer ma sincère gratitude pour votre aide précieuse et votre grande serviabilité.

À toute la Famille, HAMADI, KOMMIR et OUHAMI

Avec toute ma gratitude, je vous dédie ce travail.



REMERCIEMENTS



À notre maître et Président de thèse :

Professeur A. LOUZI,

Professeur de Chirurgie Viscérale

Je vous suis profondément reconnaissant d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je vous adresse humblement ma gratitude et mon plus grand respect pour le temps et l'attention que vous avez consacrés à ce travail.

Veillez trouver dans ce travail, cher Maître, l'expression de ma profonde reconnaissance et de mes sincères remerciements.

À notre maître et Rapporteur de thèse :

Professeur K. RABBANI,

Professeur de Chirurgie Viscérale

Je tiens à vous exprimer ma reconnaissance pour votre encadrement bienveillant tout au long de la réalisation de ma thèse.

Votre confiance, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été des atouts majeurs qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

J'ai eu l'honneur de bénéficier de votre expertise et de votre mentorat.

Malgré vos nombreux engagements professionnels, vous avez toujours fait preuve d'une grande ouverture et d'un accueil chaleureux.

Votre savoir-faire a été une source précieuse d'inspiration pour moi, et vos orientations ont guidé mes réflexions de manière constructive.

Merci infiniment pour cette collaboration enrichissante. Puisse Dieu vous accorder bonne santé, prospérité et bonheur.

À notre maître et Juge de thèse :

Professeur M. OUALI IDRISSI,

Professeur de Radiologie

Je tiens à vous exprimer mes plus sincères remerciements d'avoir accepté de faire partie de notre jury. Je vous suis reconnaissant pour la bienveillance, la collaboration et l'amabilité avec lesquelles vous m'avez accueilli.

Veillez, Cher Maître, trouver dans ce travail l'expression de ma haute considération et de mon profond respect.

À notre maître et Juge de thèse :

Professeur M. LAHKIM,

Professeur de Chirurgie Viscérale

C'est avec une grande gratitude que je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury. Votre évaluation et vos remarques sont un grand honneur pour moi, et je tiens à exprimer toute mon estime pour votre professionnalisme.

Veillez, Cher Professeur, recevoir l'expression de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À notre maître et Juge de thèse :

Professeur H. FENANE,

Professeur de Chirurgie Thoracique

Vous me faites un grand honneur en acceptant de vous associer à notre jury de thèse. Vos remarques sont un grand honneur pour moi, et je tiens à exprimer toute mon estime pour votre professionnalisme.

Veillez accepter, cher Maître, l'expression de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À notre maître :

Professeur W. Ait BELAID

Professeur de Chirurgie Viscérale

Je tiens à vous exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien indéfectible que vous m'avez apporté tout au long de ce parcours.

Votre aide précieuse, votre disponibilité constante et votre écoute attentive ont été d'une grande importance pour la réalisation de ce travail.

Je vous remercie chaleureusement pour le temps que vous m'avez consacré, vos conseils avisés et l'énorme soutien que vous m'avez offert.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de ma sincère gratitude et de ma plus haute considération.



*LISTE DES FIGURES
ET TABLEAUX*



LISTE DES FIGURES

- Figure 1.** Illustration du test de Turing.
- Figure 2.** Chronologie de l'évolution historique de l'Intelligence Artificielle.
- Figure 3.** Comparaison entre : (a) neurone biologique et (b) réseau neuronal artificiel.
- Figure 4.** Apprentissage profond ou deep learning.
- Figure 5.** Classification des images et localisation des anomalies, par réseaux de neurones convolutifs avec process de transformation des données via les couches de convolution
- Figure 6.** Les relations hiérarchiques entre l'intelligence artificielle (AI) l'apprentissage automatique (machine learning), l'apprentissage profond (deep learning) et les réseaux de neurones convolutifs (CNN).
- Figure 7.** Architecture d'un agent conversationnel.
- Figure 8.** Les applications de la vision par ordinateur en chirurgie laparoscopique.
- Figure 9.** Les composantes clés du monde de l'intelligence artificielle.
- Figure 10.** La gestion des données dans la blockchain et stockage dans le cloud.
- Figure 11.** Hépatectomie avec une incision médiane supérieure au-dessus de l'ombilic.
- Figure 12.** Vue peropératoire lors d'une laparotomie (images prises au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).
- Figure 13.** Vue peropératoire lors d'une laparotomie (images prises au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).
- Figure 14.** Plaie opératoire après laparotomie (images prises au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).
- Figure 15.** Positionnement des trocarts au cours d'une Appendicectomie (image prise au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).
- Figure 16.** La différence entre les systèmes basés sur des connaissances et ceux non basés sur des connaissances (knowledge-based or non-knowledge based).
- Figure 17.** Screenshots de l'interface utilisateur du système de dialogue Chat Ella.
- Figure 18.** Illustration d'un réseau de neurones convolutifs avec une couche d'entrée, plusieurs couches cachées et une couche de sortie avec les tâches de détection, de segmentation et de classification de motifs d'images.
- Figure 19.** Exemples d'images correctement catégorisées par le modèle : Des apparences normales : (a) et la détection des obstructions : (b) (Les scores du modèle et les prédictions sont affichés dans des encadrés au bas de chaque image).
- Figure 20.** (A) et (B) : Deux radiographies abdominales sans préparation (ASP) interprétées par le modèle proposé avec probabilité de présence d'un pneumopéritoine (à gauche) avec confirmation des résultats par TDM (à droite).
- Figure 21.** (a), (b) et (c) : Radiographies abdominales de trois filles montrant une invagination iléocolique détectée par l'algorithme (Intu =intussusception=invagination).

- Figure 22.** Exemples d'images représentant un carcinome hépatocellulaire (CHC) (a), un kyste (b), un hémangiome (c), une zone de préservation graisseuse focale (FFS) (d) et une infiltration graisseuse focale (FFI) (e). Les panneaux de gauche montrent les images originales analysées par le système d'intelligence artificielle (IA), tandis que ceux de droite présentent les encadrés délimitant chaque lésion, accompagnés des diagnostics prédits et de leur degré de confiance associé.
- Figure 23.** Flux de travail de l'outil de détection assistée par ordinateur avec le processus de segmentation, de classification et les résultats définitifs.
- Figure 24.** Des TDM représentatifs (colonne grise) montrent une tumeur au niveau du corps (a) et du queue (b) du pancréas, illustrant la correspondance de la localisation de la tumeur entre la segmentation manuelle effectuée par des radiologues (colonne verte) et les prédictions du modèle de segmentation (colonne rouge). Le contour bleu indique le pancréas, tandis que le contour jaune représente la tumeur.
- Figure 25.** (a) et (b) : Des images de TDM abdominale originale (à gauche) et résultats de segmentation automatisée (à droite). La ligne verte représente le contour du foie, et la ligne rouge marque le contour des régions traumatiques.
- Figure 26.** Résultats de détection du carcinome hépatocellulaire au niveau des images IRM par le modèle intelligent.
- Figure 27.** Algorithme de stadification. (a) un cas T2, et (b) un cas T3. Les zones magenta, jaune
- Figure 28.** Utilisation d'intelligence artificielle en endoscopie pour la détection des anomalies et l'amélioration de la qualité des images endoscopiques.
- Figure 29.** Modèle illustratif de processus d'analyse des images endoscopique.
- Figure 30.** La différence de localisation entre le système d'aide à la détection et les endoscopistes : (a) image originale, (b) vérité de terrain basée sur les délimitations des experts, (c) encadré vert du système intelligent indiquant la localisation de la lésion néoplasique, (d) marque de biopsie de l'endoscopiste indiquant la localisation de la lésion néoplasique.
- Figure 31.** Images endoscopiques montrant la détection des lésions cancéreuses
- Figure 32.** Images représentatives du cancer gastrique intra muqueux détecté par le modèle (CNN) (images prises d'une vidéo représentative).
- Figure 33.** (a) Image endoscopique montrant un cancer gastrique et (b) lésion détectée par le système intelligent (rectangle jaune) et par un endoscopiste marqué manuellement (rectangle vert).

- Figure 34.** Le système CADEYE : illustre la détection et le diagnostic d'un adénome avec (a) : Les contours de la zone autour d'un polype suspect sont délimités sous imagerie à lumière blanche. (b) : La même zone est délimitée sous imagerie couleur liée. (c) : Si la lésion est classée comme néoplasique sous imagerie, l'image endoscopique est entourée de jaune et le mot « NÉOPLASIQUE » apparaît en dessous. L'emplacement de l'évaluation est également indiqué à droite de l'image endoscopique. (d) : Image amplifiée de la lésion.
- Figure 35.** Les étapes d'analyse et d'extraction des données par l'algorithme utiliser.
- Figure 36.** Images de l'adénocarcinome papillaire (a), des adénocarcinomes tubulaires bien différenciée (b), modérée (c) et médiocre (d), carcinome à cellules en anneau (e) et carcinome mixte (f) ,(Les zones identifiées par les pathologistes et marquées par des lignes pointillées rouges correspondent bien aux zones rouges reconnues par l'algorithme).
- Figure 37.** (a) et (b) : Deux cas détectés par le système d'assistance IA qui avaient été initialement mal diagnostiqués par les pathologistes.
- Figure 38.** Le flux de travail diagnostique du pathologiste avec assistance : Après avoir examiné l'image de lame entière colorée à l'hématoxyline-éosine (H&E) (a), le pathologiste extrait un patch tumoral à un grossissement de $\times 10$ (b), le télécharge sur le modèle basé dans le cloud, qui génère des probabilités prédites pour le cholangiocarcinome (CC) et le carcinome hépatocellulaire (HCC) dans l'interface utilisateur (c). Ces résultats sont intégrés à l'impression diagnostique du pathologiste pour aboutir à un diagnostic final assisté.
- Figure 39.** Les Interfaces graphiques du modèle : (a) une région d'intérêt tumorale détecté par les pathologistes (cadre jaune), (b) la probabilité pour chaque diagnostic (ici, CHC), accompagnée d'une carte d'activation de classe pour aider à l'interprétation.
- Figure 40.** (a) image originale, (b) le modèle de segmentation : avec mise en évidence des régions de la lame entière : (vert) probablement bénignes ou normales, (orange) probablement dysplasiques et (rouge) probablement malignes avec segmentation des vaisseaux sanguins (rose) et l'inflammation (jaune), ces segmentations prises en compte pour le classement de la lame.
- Figure 41.** Étiquetage des régions par le modèle avec régions "à haut risque" (rouge) par rapport aux régions "à faible risque" (vert).
- Figure 42.** Différence entre Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée et Réalité Mixte.
- Figure 43.** Casque de visualisation : Varjo Aero.
- Figure 44.** La planification chirurgicale impliquant des utilisateurs dans le monde réel.
- Figure 45.** Les présentations des manipulateurs dans l'environnement immersif (chirurgien : couleur rouge, assistant : couleur bleue, et infirmière instrumentiste : couleur verte).

- Figure 46.** Exemple d'environnement de réalité virtuelle depuis l'intérieur de l'Oculus Rift : Informations sur le patient (à gauche), modèle 3D (au centre), et imagerie sectionnelle originale (à droite).
- Figure 47.** Casque de visualisation : HoloLens MD.
- Figure 48.** La reconstruction 3D de l'adénocarcinome rectal.
- Figure 49.** La reconstruction 3D de l'adénocarcinome du côlon droit.
- Figure 50.** Visualisation holographique pour la planification préopératoire.
- Figure 51.** (a) et (b) Images TDM axiales et sagittales montrant la tumeur pancréatique distale.
- Figure 52.** (a) La pièce imprimée en 3D de l'anatomie du patient (b) La pièce réséquée (pancréas distal et rate).
- Figure 53.** (a) model imprimer en 3D, (b) image intra opératoire prise à l'aide d'une règle en papier stérile, avec une échelle en mm. Les structures mesurées comprenaient la veine colique moyenne (MCV), l'artère colique moyenne (MCA), le tronc gastrocolique de Henlé (GTH), les veines jéjunales (JVs), l'artère iléocolique (ICA) et la veine iléocolique (ICV).
- Figure 54.** (a) Le robot ZEUS avec (b) la console de manipulation.
- Figure 55.** (a) Les bras robotiques du robot da Vinci Xi et (b) les instruments articulés.
- Figure 56.** (A) Comparaison des consoles Da Vinci Xi et SP, (B) Comparaison des robots Da Vinci Xi et SP ,(C) Les instruments de Da Vinci SP.
- Figure 57.** Le robot Da Vinci 5.
- Figure 58.** Le robot DA VINCI avec les sites d'introduction des trocars.
- Figure 59.** Le système Dexter est montré à la fois en mode LAP (Laparoscopique) et en mode RAS (Chirurgie Assistée par Robot) lors de la même procédure. Les chiffres 1 à 5 indiquent les trocars avec : (a) Les bras Dexter sont repliés en mode LAP ; (b) Les bras Dexter sont connectés en mode RAS.
- Figure 60.** Paramètres du système chirurgical Hinotori :(a) La position de chaque bras robotique, (b) Le chirurgien avec console du robot, (c) Le système sans fixation du Hinotori.
- Figure 61.** La plateforme chirurgicale robotique : Toumai.
- Figure 62.** (a) La disposition des trocars du système chirurgical Toumai et (b) vue postopératoire des incisions.
- Figure 63.** Les composants du robot chirurgicale Revo-i.
- Figure 64.** Exemples des bras articulés (a), (b) et des bras robotiques continus flexibles sans camera (c) et avec caméra (d).
- Figure 65.** Niveaux d'autonomie des robots chirurgicaux.
- Figure 66.** Illustrations des résultats du système de détection des instruments chirurgicaux. Le système a réussi à détecter les instruments chirurgicaux dans diverses scènes. Tels que les ciseaux coagulateurs laparoscopiques.

- Figure 67.** (a) images laparoscopique et (b) les résultats obtenue par le model intelligent avec détection de canal biliaire en vert et la paroi antérieur en violet.
- Figure 68.** (A), (B) : images originales et (A'), (B') : les résultats de prédiction du modèle en bleu.
- Figure 69.** Marquages intra-opératoires des branches nerveuses autonomes colorectales étiquetées par le modèle d'apprentissage profond, et les résultats pathologiques : (A) image prédite, (B) marquage de la branche colorectale avec un clip chirurgical, et (C) tissu nerveux (flèche noire) dans l'examen pathologique.
- Figure 70.** Résultats de la segmentation par le modèle intelligent (a) Image originale avec A : artère hépatique commune, F : tissu adipeux, LN : ganglion lymphatique ; * : nerfs. (b) Prédiction par le modèle en bleu cyan.
- Figure 71.** Trois exemples distincts de prédictions du modèle, comparées aux images d'origine, sont présentés sous forme de superpositions : les zones "Go" sont représentées par une superposition verte, tandis que les zones "No-Go" sont représentées par une superposition rouge.
- Figure 72.** Guidage automatisée du caméra par un robot intelligent.
- Figure 73.** Aspiration autonome du sang pour les cas de traumatisme en chirurgie avec l'outil d'aspiration robotisé qui débarrasse le champ opératoire du sang en écoulement.
- Figure 74.** Détection de la plaie par le model intelligent : DeepLabV3+.
- Figure 75.** La trajectoire de pénétration d'aiguille par le robot avec : (a) Position initiale de l'aiguille, (b) Pénétration dans le tissu et (c) Sortie du tissu.
- Figure 76.** Le Robot Autonome pour les Tissus Mous (STAR).
- Figure 77.** Dispositif HoloLens en salle d'opération : (a) Le chirurgien, tout en étant stérile, porte et utilise le dispositif à l'aide des gestes, (b) visualisation d'un modèle des structures hépatiques reconstruites en 3D superposé sur le champ opératoire.
- Figure 78.** Les méthodes traditionnelles de marquage.
- Figure 79.** Etapes d'insertion de système du marquage avec 1 : les aimants sont placés sur les douilles du cadre guide. La couverture protectrice de la couche adhésive de chaque aimant est retirée. 2 : les aimants sont installés sur la peau à l'aide du cadre guide. 3 : les aimants sont recouverts d'un film protecteur et le patient est prêt pour la tomodensitométrie (CT). 4 : le marqueur stérile est fixé sur ces aimants pour la réalité augmentée pendant l'intervention chirurgicale.
- Figure 80.** Moment de l'installation du marqueur intra opératoire dans des conditions stériles.

- Figure 81.** Modèle 3D de la reconstruction de l'anatomie du patient et de son superposition pendant l'opération chez un patient atteint d'un cancer de l'ampoule inférieure du rectum.
- Figure 82.** La préparation du champ chirurgical avec : (A) fixation de marqueur stérile sur le processus xiphoïde avant l'intervention et (B) La mise de marqueur comme point d'enregistrement.
- Figure 83.** Planification préopératoire de la procédure à l'aide des images de tomographie assistée par ordinateur (A) et d'un modèle 3D (B), illustrant le trajet tortueux de l'artère splénique (SA), la proximité de la tumeur (*) la veine splénique (SV), veine porte (PV), et la veine mésentérique inférieure (IMV).
- Figure 84.** (A) et (B) : vue intra opératoire avec identification du système vasculaire utilisant ARAS, veine splénique (SV), artère splénique (SA), veine porte (PV), artère hépatique (HA), veine mésentérique supérieure (SMV), veine mésentérique inférieure (IMV).
- Figure 85.** Spécimen réséqué.
- Figure 86.** La procédure de splénectomie laparoscopique guidée par RA : (A) Le modèle de reconstruction 3D, la forme de l'artère splénique et sa relation spatiale avec la bordure supérieure du pancréas. (B) La position et la direction du tunnel rétro splénique sont planifiées, et la largeur du pédicule splénique est mesurée. (C) Ponction du trocart guidée par RA. (D) Dissection de l'artère splénique guidée par RA. (E) Établissement du tunnel rétro splénique guidé par RA. (F) Après l'établissement du tunnel du pédicule splénique, le pédicule splénique est suspendu et l'Endo-GIA peut être traversé à travers le tunnel.
- Figure 87.** Le dispositif intelligent : iThermonitor.
- Figure 88.** Exemples de dispositifs de surveillance à distance.
- Figure 89.** Pansement intelligent : VeCare.
- Figure 90.** Applications potentielles des dispositifs portables dans la prise en charge préopératoire et postopératoire des patients opérés pour une chirurgie abdominale majeure.
- Figure 91.** Bibliothèque virtuelle avec plusieurs situations en 3D.
- Figure 92.** Espace virtuel avec les images de TDM et les données associées affichées dans un tableau en 2D.
- Figure 93.** (a) La simulation en réalité virtuelle recrée une scène de colectomie sigmoïde laparoscopique, avec une ligne verte représentant la coupe planifiée. (b) La simulation permet de répliquer la structure de la membrane, où la coupe est réussie seulement si la main gauche exerce une tension suffisante sur le tissu. (c) Une coupe claire ne peut pas être réalisée sans tension, et un excès de tension provoque la déchirure du tissu, avec un retour de force pour ajuster la tension.

- Figure 94.** La vue à travers les HoloLens. Le chirurgien (à gauche) guide une résidente (à droite) lors d'une chirurgie laparoscopique virtuelle en utilisant un casque de réalité augmentée transparent.
- Figure 95.** Illustration d'évaluation automatisée des compétences techniques en chirurgie par intelligence artificielle.
- Figure 96.** Screenshots de l'interface LapBot Safe Chole : Le joueur choisit la zone de dissection optimale à partir d'une image vidéo, puis reçoit un retour sur sa décision avec l'annotation IA de la zone "Go". Pour passer au niveau suivant, il doit réussir cinq rondes consécutives.

LISTE DES TABLEAUX

- TABLEAU I :** TEMPS MOYEN DE REVISION PAR LAME SELON LA METHODE UTILISEE.
- Tableau II :** CARACTERISTIQUES DEMOGRAPHIQUES ET COMORBIDITES DES PATIENTS.
- Tableau III :** COMPARAISON DES MODÈLES PRÉDICTIFS.
- Tableau IV :** LES PERFORMANCES DU LOGICIEL : HYPOTENSION PREDICTION INDEX (HPI).



ABBREVIATIONS



LISTE DES ABREVIATIONS

AFP	: Alpha-fœtoprotéine
ALAT	: Alanine Aminotransférase
ANN	: Artificial Neural Network (Réseau de Neurones Artificiels)
ASAT	: Aspartate Aminotransférase
ASP	: Abdomen Sans Préparation (radiographie)
CC	: Cholangiocarcinome
CCR	: Cancer Colorectal
CHC	: Carcinome Hépatocellulaire
CNN	: Convolutional Neural Network (Réseau de Neurones Convolutifs)
CRP	: Protéine C-Réactive
CV	: Computer Vision (Vision par Ordinateur)
DL	: Deep Learning (Apprentissage Profond)
ESS115	: Emergency Surgery Score (Score de Chirurgie d'Urgence)
H&E	: Hématoxyline-Éosine
HMD	: Head Mounted Display (Casque de Visualisation)
IA	: Intelligence Artificielle
ICV	: Veine Iléocolique
IMV	: Veine Mésentérique Inférieure
IRM	: Imagerie par Résonance Magnétique
LFH	: Lésions Focales Hépatiques
MCA	: Artère Colique Moyenne
MCV	: Veine Colique Moyenne
ML	: Machine Learning (Apprentissage Automatique)
NFS	: Numération Formule Sanguine
NLP	: Natural Language Processing (Traitement du Langage Naturel)
NSQIP	: National Surgical Quality Improvement Program
OB	: Œsophage de Barrett
POTTER	: Prédictive Optimal Trees in Emergency Surgery Risk
RA	: Réalité Augmentée (Augmented Reality)
RM	: Réalité Mixte
RV	: Réalité Virtuelle
SAD	: Système d'Aide à la Décision
SRC	: Surgical Risk Calculator (Calculateur de Risque Chirurgical)
TDM	: Tomodensitométrie



PLAN



INTRODUCTION.....	- 1 -
MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	- 4 -
HISTOIRE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	- 6 -
1. Introduction :	- 7 -
2. La Naissance et les Racines de l'IA (1940s - 1960s) :.....	- 7 -
3. L'Hiver de l'Intelligence Artificielle (1960s -1980s) :.....	- 9 -
4. La Renaissance et Les Système Experts (1980s - 1990s) :.....	- 9 -
5. La Révolution du Deep Learning et l'IA Moderne (2000s - Présent) :	- 10 -
CONCEPTS ET DÉFINITIONS	- 12 -
1. L'Intelligence Humaine :	- 13 -
2. L'Intelligence Artificielle :.....	- 15 -
2.1. Définition et Types :	- 15 -
2.2. Big Data :	- 16 -
2.3. Algorithme :.....	- 16 -
2.4. Réseaux de Neurones Artificielles (Artificial neural network ou ANN) :	- 17 -
2.5. L'Apprentissage Automatic (Machine Learning ou ML) :.....	- 18 -
2.6. L'Apprentissage Profond (Deep Learning ou DL) :	- 20 -
2.7. Les Réseaux De Neurones Convolutifs (CNN) :	- 21 -
2.8. Le Traitement Du Langage Naturel (Natural Language Processing ou NLP) :.....	- 22 -
2.9. Les Agents Conversationnels Et Les Chatbots :	- 23 -
2.10. La Vision par Ordinateur (Computer Vision ou CV) :.....	- 24 -
2.11. Le Robot:	- 25 -
2.12. La Blockchain:	- 26 -
2.13. Le Cloud :	- 26 -
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN CHIRURGIE VISCERALE	- 27 -
I. La Chirurgie Viscérale :.....	- 28 -
1. Définition et Evolution :.....	- 28 -
2. Techniques Actuelles Au Sein De Service De Chirurgie Viscérale :CHU Med VI :.....	- 29 -
2.1. La Laparotomie :	- 29 -
2.2. La Laparoscopie :.....	- 32 -

II. L'Intégration de l'Intelligence Artificielle en Chirurgie Viscerale :	- 34 -
1. La Phase Pré Opératoire :	- 34 -
1.1. Le Diagnostic Automatique et les Systèmes d'Aide à la Décision (SAD) :	- 34 -
1.2. La Planification Pré opératoire :	- 74 -
2. La Phase Intra Opératoire :	- 95 -
2.1. Intelligence Artificielle en Anesthésie :	- 95 -
2.2. Intelligence Artificielle et Robots Chirurgicaux :	- 97 -
2.3. Le Guidage en Temps Réel :	- 126 -
3. La Phase Post Opératoire :	- 137 -
3.1. La Prediction des Complications Post Opératoires :	- 137 -
3.2. La Surveillance en Post Opératoire :	- 140 -
3.3. La Gestion Post Opératoire des Hospitalisations :	- 143 -
3.4. Rédaction Automatique des Comptes Rendu Opératoires :	- 144 -
3.5. La Réhabilitation Améliorée Après Chirurgie (RAAC) :	- 145 -
3.6. La Télémédecine et la Surveillance A Distance :	- 145 -
4. L'utilisation de L'Intelligence Artificielle dans la Formation des Etudiants et des Résidents en Chirurgie Viscerale :	- 150 -
4.1. La Formation des Etudiants:	- 150 -
4.2. La Formation des Résidents:	- 155 -
4.3. Évaluation des compétences chirurgicales des résidents :	- 159 -
LES LIMITES, LES DEFIS, LES CONSIDERATIONS ETHIQUES ET LEGALES	- 162 -
1. Les Limites et les Défis :	- 163 -
2. Les Considérations Ethiques et Légales :	- 167 -
2.1. Les Considérations Éthiques:	- 167 -
2.2. Les Considérations Règlementaires et Légales :	- 172 -
ACCEPTATION ET ADOPTION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	- 173 -
CONCLUSION	- 173 -
RESUME	- 173 -
BIBLIOGRAPHIE	- 173 -



INTRODUCTION



À l'ère contemporaine, et plus particulièrement depuis la seconde moitié du XX^e siècle, le développement exponentiel des techniques et des avancées technologiques transforme profondément notre vie quotidienne. Chaque jour, de nouvelles innovations révolutionnent nos façons de travailler, de communiquer et même de soigner. Cette dynamique de progrès rapide impacte de nombreux domaines, allant de la production industrielle à la chirurgie, en passant par l'éducation.

Parmi les spécialités les plus impactées par cette révolution, la chirurgie viscérale occupe une place centrale. Consacrée à la prise en charge des pathologies complexes des organes abdominaux, incluant le tube digestif, le foie, le pancréas et d'autres structures vitales, elle a connu une évolution majeure, passant des techniques traditionnelles de laparotomie à des approches mini-invasives comme la coelioscopie et la chirurgie robotisée.

Cependant, malgré ces avancées, la chirurgie viscérale demeure confrontée à des défis majeurs, tels que la complexité anatomique des structures traitées, la variabilité interindividuelle et la nécessité d'une prise de décision rapide en situation critique. Cela exige une expertise pointue et une grande capacité d'adaptation de la part des chirurgiens.

Face à ces défis, l'introduction de l'IA dans le secteur chirurgical, et plus particulièrement en chirurgie viscérale, marque un tournant radical. Contrairement aux précédentes évolutions technologiques qui se limitaient principalement à la fourniture de nouveaux outils et instruments aux chirurgiens, l'IA offre la possibilité d'ajouter une nouvelle dimension cognitive à la pratique chirurgicale.

Grâce à sa capacité d'analyser des volumes massifs de données pour affiner la prise de décision, des modèles prédictifs et des algorithmes d'apprentissage automatique, l'intelligence artificielle transforme profondément la chirurgie viscérale en apportant des solutions innovantes à différents stades de la prise en charge. De la planification préopératoire à l'assistance en temps réel pendant l'intervention chirurgicale, jusqu'à la gestion postopératoire, l'IA offre de nouvelles opportunités pour améliorer la précision, l'efficacité et la sécurité des interventions.

Cette symbiose homme-machine soulève des interrogations majeures, notamment en ce qui concerne la fiabilité des systèmes d'IA, la sécurité, la formation des chirurgiens à ces nouvelles technologies et les implications médico-légales des décisions assistées par algorithmes.

L'IA ne se limite pas à un rôle d'outil complémentaire, mais modifie en profondeur la pratique chirurgicale, redéfinissant les protocoles et les responsabilités des chirurgiens.

Cette thèse ambitionne d'explorer en profondeur les horizons et les dynamiques de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale, en scrutant les avancées technologiques et les implications pratiques. Elle se penche également sur les perspectives futures de cette combinaison homme-machine et sur son potentiel à redéfinir l'avenir de la chirurgie viscérale.

À travers une analyse minutieuse de la littérature et des données, nous chercherons à déterminer comment ces innovations peuvent être intégrées de manière sécurisée et efficace dans la pratique chirurgicale quotidienne, tout en mettant en lumière les défis nouveaux liés à la formation et à la réglementation nécessaires pour une adoption étendue et sécurisée de ces technologies.



MATÉRIELS ET MÉTHODES



I. Caractéristiques de l'étude :

Cette étude se présente comme une analyse pédagogique, visant à examiner l'intégration de l'intelligence artificielle dans la chirurgie viscérale. Elle repose sur une revue critique et approfondie des travaux scientifiques existants, avec un accent particulier sur l'évolution de cette technologie et sur son intégration en chirurgie viscérale.

L'objectif principal de cette revue de littérature est de retracer les différentes étapes de l'introduction de l'IA en chirurgie viscérale, d'évaluer son impact sur les pratiques cliniques et d'explorer ses contributions, les défis qu'elle présente, ainsi que ses perspectives d'avenir.

II. Matériels et Méthodes :

Nous avons mené une revue méthodique et systématique de la littérature sur l'intégration de l'intelligence artificielle dans le domaine de la chirurgie viscérale, en mettant l'accent sur l'évolution des technologies, leurs applications cliniques, ainsi que les défis associés à leur adoption dans la pratique chirurgicale.

Les recherches bibliographiques ont été réalisées à partir des bases de données : PubMed, ScienceDirect et Google Scholar, en utilisant des mots-clés spécifiques tels que : Artificial Intelligence, visceral surgery, complications prediction, autonomous robots, augmented reality, surgical decision-making, preoperative planning, and postoperative monitoring .

Initialement, plus de 400 articles pertinents ont été recensés, puis 220 publications récentes ont été sélectionnées pour répondre aux critères méthodologiques rigoureux, comprenant des études quantitatives et qualitatives. Ces articles ont été retenus pour leur pertinence et leur contribution à l'étude de l'intégration de l'IA dans la chirurgie viscérale, offrant ainsi une base solide pour comprendre les enjeux et les perspectives de cette technologie dans ce domaine en pleine évolution.



*HISTOIRE
DE L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE*



1. Introduction :

L'intelligence artificielle a parcouru un long chemin depuis ses débuts hypothétiques jusqu'à devenir une technologie omniprésente dans notre quotidien. L'intelligence artificielle tire ses origines de réflexions anciennes sur la reproduction des capacités humaines par des dispositifs mécaniques.

La première mention d'un automate humanoïde remonte cependant au IIIe siècle en Chine, lorsque l'ingénieur mécanicien Yan Shi créa à l'empereur Mu de Zhou un automate humanoïde fabriqué à partir de cuir, de bois et dotée d'organes artificiels.

Au XIIe siècle, Al-Jazari, érudit islamique, conçut un automate capable d'exécuter des mouvements simples, tel que frapper des cymbales, en reproduisant de manière mécanique certaines actions humaines. Cette réalisation traduisait une recherche d'automatisation des gestes, ouvrant la voie à l'idée d'imiter le comportement humain par des mécanismes.

Plus tard, à la Renaissance, Léonard de Vinci élaborait des schémas d'automates inspirés de l'anatomie humaine, illustrant une volonté d'intégrer la compréhension des mouvements corporels à des dispositifs mécaniques.

Ces créations, bien qu'élémentaires, marquaient les prémices d'une réflexion sur la reproduction artificielle des fonctions humaines, annonçant les fondements de ce qui deviendra, à terme, le concept de l'intelligence artificielle. [1]

2. La naissance et les racines de l'IA (1940s – 1960s) :

L'histoire de l'intelligence artificielle trouve ses premières racines dans la Seconde Guerre mondiale. En 1942, le mathématicien Alan Turing travaillait sur des problématiques bien plus pratiques. Il développe la machine The Bombe, destinée à décrypter le code Enigma utilisé par l'armée allemande. En 1950, Alan Turing publia un article pionnier intitulé "Computing Machinery and Intelligence", dans lequel il introduisit le Test de Turing. [2]

1.1. Le Test de Turing (The Imitation Game):

Suite à une simple question : Une machine peut penser ? Alan Turing a proposé le célèbre Test de Turing, un critère selon lequel une machine est considérée comme intelligente en déterminant si un humain (examineur) peut la distinguer d'un autre humain (humain de contrôle) à travers une conversation.

Si l'examineur ne parvient pas à différencier l'ordinateur de l'humain, cela signifie que l'ordinateur a réussi le test. Ce test demeure une référence essentielle dans le domaine de l'intelligence artificielle. [3]

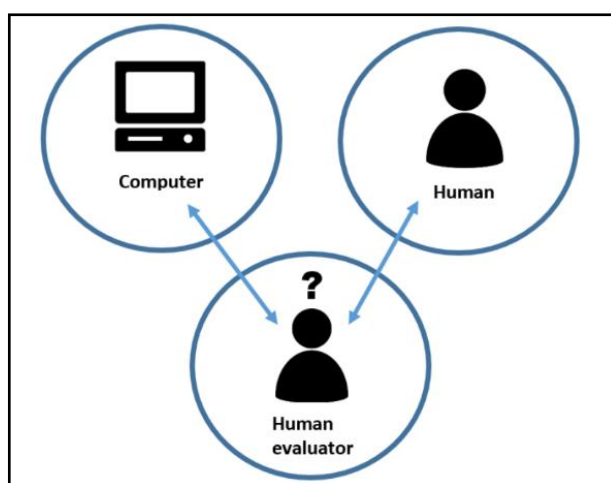


Figure 1. Illustration du test de Turing. [4]

1.2. La Conférence de Dartmouth (1956) :

En 1956, généralement considéré comme l'année de la naissance de l'Intelligence Artificielle, et durant la célèbre conférence de Dartmouth, organisée par Marvin Minsky et John McCarthy. Pendant huit semaines, des chercheurs de divers horizons sont réunis avec l'objectif commun de créer des machines capables de simuler l'intelligence humaine. C'est ici que le terme "Intelligence Artificielle" est officiellement adopté.

Parmi les participants figuraient des pionniers tels que Nathaniel Rochester et Claude Shannon, qui ont contribué à poser les bases de la recherche en IA. [2]

3. L'Hiver de l'intelligence artificielle (1960s –1980s) :

Durant les années qui ont suivi, l'IA a connu quelques succès notables, tels que la création du programme ELIZA en 1966 par Joseph Weizenbaum. Ce programme simulait une conversation humaine, marquant une première tentative de passer le Test de Turing. Un autre exemple est le développement du programme General Problem Solver par Herbert Simon, Cliff Shaw, et Allen Newell, qui résolvait automatiquement des problèmes simples comme les Tours de Hanoï.

Malgré ces premiers succès, l'IA a subi un coup dur dans les années 1970. En 1973, le rapport Lighthill, commandé par le Conseil de la recherche scientifique britannique, a critiqué sévèrement l'optimisme des chercheurs en IA. Ce rapport soutenait que les machines ne pourraient jamais dépasser le niveau d'un amateur expérimenté dans des domaines comme les échecs et que le raisonnement basé sur le bon sens resterait hors de portée.

Ce rapport, ainsi que la réduction des financements gouvernementaux aux États-Unis et au Royaume-Uni, marquent le début d'une période de stagnation prolongée dans la recherche en intelligence artificielle, C'était l'Hiver de l'IA. [2]

4. La Renaissance et Les système Experts (1980s – 1990s) :

Dans les années 1980, l'IA connaît un renouveau, en particulier avec les Systèmes Experts, ces systèmes utilisaient des règles prédéfinies pour résoudre des problèmes spécifiques. L'un des systèmes experts les plus célèbres est « Deep Blue » d'IBM, qui a marqué l'histoire en 1997 en battant le champion du monde d'échecs Garry Kasparov. Deep Blue, bien que très performant dans un domaine aussi formalisé que les échecs, illustre cependant les limites des systèmes experts dans des tâches nécessitant une adaptation et un apprentissage plus flexibles. Parmi les systèmes experts célèbres en recherche médicale, on peut citer MYCIN, un système développé par l'Université de Stanford en Californie (États-Unis). Construit à partir de plus de 600 règles explicites, MYCIN permet d'identifier la bactérie responsable d'une infection et d'optimiser le traitement antibiotique approprié. [2] [5]

5. La Révolution du Deep Learning et l'IA Moderne (2000s – Présent) :

5.1. Le Triomphe du Deep Learning :

Le véritable tournant dans l'histoire de l'IA est survenu avec l'essor du Deep Learning, une méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels.

En 2015, Google a bouleversé la communauté scientifique en développant l'AlphaGo, un programme capable de battre le champion du monde du jeu de Go, un jeu bien plus complexe que les échecs. AlphaGo utilise des algorithmes de deep learning qui lui permettent de " penser " de manière autonome et de s'adapter à des situations non préprogrammées, prouvant ainsi la puissance des réseaux de neurones pour des tâches complexes. [2]

5.2. L'IA Moderne : Applications Contemporaines :

L'intelligence artificielle a profondément transformé plusieurs secteurs clés, notamment la finance, le marketing, le transport et l'urbanisme.

Dans le domaine financier, elle est utilisée pour la détection des fraudes et la personnalisation des campagnes marketing. Dans le transport, elle permet d'optimiser les itinéraires, tandis qu'en urbanisme, elle joue un rôle central dans la gestion des villes intelligentes.[6]

Le développement des assistants personnels et des chatbots avancés illustre également l'essor de l'IA moderne. Siri, lancé par Apple, a marqué une étape importante en ouvrant la voie à des outils tels que Google Now, Alexa, et Cortana, qui ont révolutionné l'assistance vocale et l'automatisation domestique. Ces innovations témoignent du potentiel de l'IA à intégrer des technologies avancées dans la vie quotidienne.

Cet élan s'est poursuivi avec des avancées majeures, notamment l'introduction de GPT-3 par OpenAI en 2020, suivi de ChatGPT en 2022, un modèle doté de 175 milliards de paramètres. Grâce à sa capacité à générer un texte quasi indiscernable de celui produit par un humain, il a marqué une étape décisive dans l'évolution de l'intelligence artificielle.

En 2025, cette progression se poursuit avec l'émergence de nouveaux programmes tels que Claude 3.5, Gemini 2.0 et DeepSeek, offrant des performances avancées en génération de texte et en assistance intelligente.[7] [8]

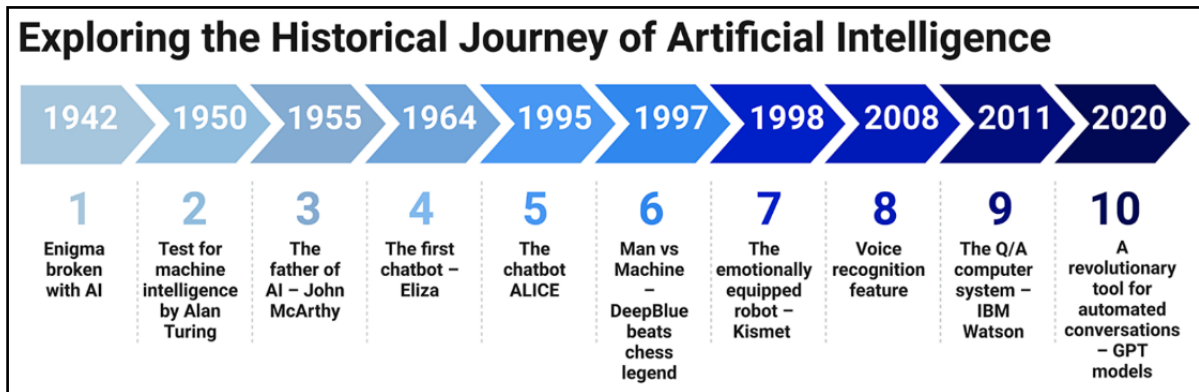


Figure 2. Chronologie de l'évolution historique de l'Intelligence Artificielle. [9]

L'histoire de l'intelligence artificielle est marquée par des périodes d'optimisme et de stagnation, mais elle continue d'évoluer rapidement. Des débuts de la robotique théorique aux systèmes modernes de deep learning, l'IA est devenue une force incontournable qui transforme profondément notre société.

Sa trajectoire, jalonnée de défis et d'avancées, nous montre que l'IA n'est pas seulement une technologie du futur, mais une réalité qui redéfinit déjà nos vies et nos institutions.



CONCEPTS ET DÉFINITIONS



1. L'Intelligence Humaine :

L'intelligence comme définition, peut être conceptualisée à partir de plusieurs perspectives, notamment étymologique, neurophysiologique et psychologique.

1.1. Origine étymologique :

Le terme « intelligence » dérive du latin « intellegentia », qui provient de « intellegere », signifiant " comprendre, interpréter, remarquer ". Elle désigne principalement la capacité de compréhension. [10]

1.2. Aspects cognitifs et neurophysiologiques :

L'intelligence est une fonction qui mobilise un ensemble de processus psychiques et neurophysiologiques pour organiser la perception du réel en pensées et en actions. Chez l'être humain et certains animaux, cette organisation permet l'adaptation et la réponse aux stimuli externes et internes.

Les fonctions mentales liées à l'intelligence sont intimement connectées à la structure du cerveau et aux systèmes physiologiques. La cognition et la compréhension résultent d'interactions complexes entre le cerveau et d'autres parties du corps, soulignant l'importance du système nerveux central dans le processus intellectuel.

On déduit que l'intelligence est la capacité d'apprendre de l'expérience, de s'adapter, de façonner et de sélectionner des environnements.[10]

Il existe de nombreuses théories de l'intelligence qui ont été proposées, on peut citer :

- **Les Théories psychométriques :**

Considèrent l'intelligence comme une « carte » du fonctionnement mental. Délimitent des structures mentales fondamentales dérivées de l'analyse des performances aux tests psychométriques. [11]

▪ **Les Théories systémiques :**

Tentent de caractériser les structures et mécanismes de l'esprit qui constituent l'intelligence. Incluent des théories notables comme celles de Gardner et Sternberg.

✓ **La théorie des intelligences multiples de Howard Gardner (1983) :**

Propose que l'intelligence ne soit pas une capacité unique mesurable par un seul test de QI, mais qu'elle se compose de plusieurs types distincts d'intelligences tels que : L'intelligence linguistique, logico-mathématique, spatiale, musicale, corporelle-kinesthésique, interpersonnelle et intrapersonnelle etc. [11]

✓ **La Théorie de Sternberg (1985) :**

Selon Sternberg l'intelligence se divise en trois ensembles de compétences : créatives, analytiques et pratiques associées à des compétences basées sur la sagesse.

Selon cette théorie, les individus sont jugés intelligents s'ils : Se fixent des objectifs adaptés à leur environnement pour atteindre leurs aspirations, exploitent leurs forces tout en corrigeant leurs faiblesses et s'adaptent, modifient ou choisissent leur environnement en fonction de leurs besoins. [11]

▪ **Les Théories culturelles :**

Suggèrent que l'intelligence doit être comprise dans le cadre culturel qui l'encadre. [11]

L'intelligence est un concept aux multiples facettes, dont la définition a évolué au fil du temps en fonction des disciplines et des approches adoptées. Elle reflète une réalité complexe et dynamique. Cette diversité d'interprétations souligne non seulement la richesse du concept, mais aussi la difficulté de l'appréhender de manière universelle et définitive.

2. L'Intelligence Artificielle :

2.1. Définition et Types :

L'intelligence artificielle désigne la science et l'ingénierie visant à créer des machines intelligentes en utilisant des algorithmes ou des règles, que la machine imite pour reproduire les fonctions cognitives humaines, telles que l'apprentissage, le raisonnement ou la résolution de problèmes. [12]

Plutôt que d'être une seule technologie, l'IA englobe une variété de processus et de comportements issus de modèles et d'algorithmes informatiques. Récemment, les avancées dans ce domaine ont été favorisées par des modèles computationnels améliorés, des ordinateurs puissants et l'accès à de grandes quantités de données (Big Data), permettant des progrès notables dans des secteurs comme l'apprentissage automatique (ML), le traitement du langage naturel (NLP), les technologies vocales, les assistants intelligents et la robotique.

L'intelligence artificielle se divise en trois grandes catégories :

- **L'intelligence artificielle étroite ou IA faible :**

Il s'agit de la capacité d'une machine à se spécialiser et à résoudre un problème spécifique.

Ces systèmes sont orientés vers des objectifs précis et peuvent, dans certaines conditions, égaler ou même surpasser les performances humaines dans des tâches spécifiques. C'est la forme d'IA actuellement disponible, comme Siri d'Apple ou Alexa d'Amazon. [13]

- **L'intelligence artificielle générale ou IA forte :**

Cette catégorie désigne la capacité d'une machine à atteindre des fonctions cognitives générales équivalentes à celles d'un être humain dans divers domaines. Une telle machine pourrait apprendre, résoudre une large variété de problèmes et agir d'une manière indiscernable de celle d'un humain.

- **L'intelligence artificielle super- intelligente :**

État hypothétique où la machine surpasserait toutes les capacités humaines et deviendrait consciente d'elle-même. [13]

2.2. Big Data :

Le concept de big data est directement lié au stockage et à l'exploitation rapide de grandes quantités de données brutes, souvent complexes, non systématiquement structurées et provenant de sources multiples. [14]

Ces données se distinguant par un volume, une vitesse et une variété considérables, elles doivent être disponibles en temps réel pour une analyse immédiate requérant des technologies spécifiques et des méthodes analytiques adaptées pour être exploiter et convertis en informations utilisables.

Depuis les années 1980, la quantité de données collectées a considérablement augmenté, doublant tous les 40 mois. Récemment l'ère du big data a vu une hausse des données alphanumériques, tandis que les réseaux sociaux ont généré des quantités géantes de fichiers audio et d'images. L'utilisation des smartphones et les dispositifs portables contribue à la production de téraoctets de données. [15]

2.3. Algorithme :

Un algorithme se définit comme une suite ordonnée d'opérations ou d'instructions à exécuter suivant une logique spécifique, dans le but de répondre à une question ou de résoudre un problème donné.

Bien que les algorithmes modernes soient principalement exécutés par des ordinateurs, leur origine remonte bien avant l'invention des premiers microprocesseurs. Le terme algorithme dérive du nom latinisé Algorithmi, attribué au mathématicien Muhammad ibn Musa al-Khawarizmi.

Traditionnellement, les algorithmes étaient conçus pour une exécution manuelle. Aujourd'hui, ils sont programmés sous forme de code informatique et exécutés par des machines.

Ces algorithmes programmables, appelés algorithmes computationnels, représentent des processus embarqués dans des outils numériques pour réaliser une série d'opérations visant un objectif précis. [5]

On distingue deux catégories principales d'algorithmes : les algorithmes explicites et les algorithmes implicites. Les algorithmes explicites reposent sur des règles logiques rigoureusement définies par leurs concepteurs.

En revanche, les algorithmes implicites adoptent une logique émergente, dérivée d'une architecture prédéfinie et ajustée par un apprentissage à partir de données réelles.

Lors de cet apprentissage, le système identifie les relations entre les variables d'entrée mesurées et les résultats attendus. Ces algorithmes sont la base de l'IA, permettant l'apprentissage, l'automatisation et l'optimisation des tâches. [5]

2.4. Réseaux de Neurones Artificielles (Artificial Neural Network ou ANN) :

Les réseaux neuronaux artificiels sont des modèles mathématiques inspirés du cerveau humain. Ils simulent le traitement de l'information par des neurones biologiques pour permettre aux machines d'apprendre et de générer des connaissances.

Le système est constitué d'un grand nombre d'éléments de traitement hautement interconnectés, appelés neurones, qui travaillent ensemble pour résoudre un problème et transmettre des informations à travers des synapses. Les neurones sont étroitement interconnectés et organisés en couches. La couche d'entrée reçoit les données, tandis que la couche de sortie génère le résultat final. Entre les deux, une ou plusieurs couches cachées sont généralement situées. Ces réseaux neuronaux artificiels sont l'une des meilleures, voire la seule, solution pour concevoir des machines intelligentes. [16]

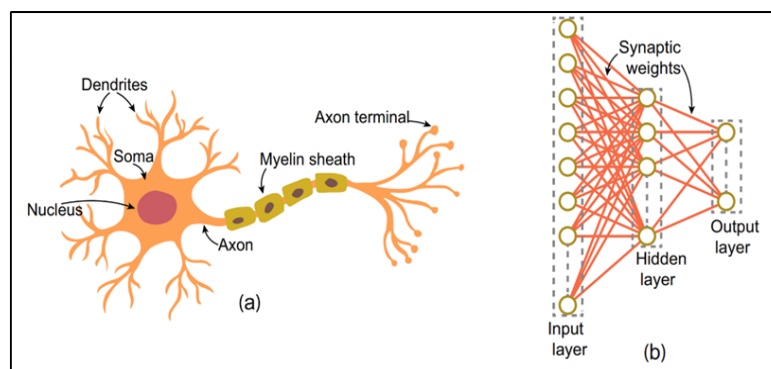


Figure 3. Comparaison entre : (a) neurone biologique et (b) réseau neuronal artificiel. [17]

2.5. L'Apprentissage Automatique (Machine Learning ou ML) :

L'apprentissage automatique, également connu sous le terme Machine Learning (ML), constitue une sous-discipline fondamentale de l'intelligence artificielle. Il se définit comme un système qui construit un modèle prédictif en identifiant des motifs au sein des données d'entrée, puis utilise ce modèle pour effectuer des prédictions pertinentes sur des données inédites.

Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent acquérir des connaissances et optimiser leurs performances de manière autonome à partir de l'expérience, sans être explicitement programmés. Cette faculté d'apprentissage constitue une caractéristique essentielle de l'intelligence artificielle. [18]

Il existe plusieurs types d'algorithmes d'apprentissage automatique, les plus courants sont l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé, l'apprentissage par renforcement et l'apprentissage profond.

- **L'apprentissage supervisé (supervised learning) :**

S'identifie comme l'utilisation d'un ensemble de données en entrée avec des résultats connus, étiquetés, en sortie, puis identifie des modèles qui établissent une corrélation entre les résultats et les entrées afin de faire des prédictions.

Dans cette approche, l'algorithme doit connaître les conclusions qu'il doit tirer à partir d'un ensemble de données donné. Avec suffisamment de données et des réponses correctement étiquetées, l'algorithme apprend finalement à faire des prédictions à partir de données qu'il n'a jamais vues auparavant. L'apprentissage supervisé a été largement appliqué dans le domaine de la santé, fournissant un support décisionnel clinique basé sur les données pour mapper les variables d'entrée dans des catégories discrètes (tels que, l'utilisation de l'imagerie médicale pour diagnostiquer les tumeurs cancéreuses) et des analyses prédictives avec une sortie continue (à savoir l'utilisation des données du dossier médical pour faire des prédictions sur les récurrences, le pronostic et la mortalité d'une pathologie). [18]

- **L'apprentissage non supervisé (un-supervised learning) :**

L'apprentissage non supervisé est employé pour découvrir la structure des données et effectuer des prédictions en se basant uniquement sur les entrées. Cet algorithme est particulièrement pertinent dans des contextes où les résultats sont inconnus ou lorsque l'étiquetage des données s'avère trop coûteux.

Il est principalement utilisé à des fins exploratoires, notamment pour le regroupement, la détection d'anomalies et la reconnaissance de motifs dans une diversité de types de données.

Cet apprentissage, qui se déroule sans intervention humaine pour l'étiquetage des résultats, est considéré comme proche d'une « véritable intelligence artificielle ».

L'apprentissage non supervisé, plus vulnérable aux erreurs sans supervision humaine, est souvent associé à l'apprentissage supervisé. Cela forme l'apprentissage semi-supervisé, qui exploite principalement des données non étiquetées avec une petite portion de données étiquetées. [18]

- **L'apprentissage par renforcement (Reinforcement learning) :**

L'apprentissage par renforcement est un algorithme d'apprentissage autonome où un agent interagit avec son environnement, utilisant des récompenses et des erreurs comme rétroaction pour s'améliorer.

Cette méthode est efficace pour des tâches de prise de décision séquentielles sans avoir recours à des données ou à l'étiquetage préalable. Elle est utilisée dans les voitures autonomes, et la robotique (par exemple : chirurgie assistée par robot). [18]

Grâce à ses différentes approches (supervisée, non supervisée et par renforcement) l'apprentissage automatique constitue une sous-discipline essentielle de l'intelligence artificielle, jouant un rôle central dans l'analyse des données et l'aide à la décision. Il facilite la modélisation de phénomènes complexes et contribue à l'optimisation des performances des systèmes intelligents.

2.6. L'Apprentissage Profond (Deep Learning ou DL) :

L'apprentissage profond, une branche de l'apprentissage automatique, simule le traitement du cerveau humain en traitant simultanément plusieurs ensembles de données.

Les données passent par des couches distinctes, appelées couches cachées (Hidden Layer), où chaque évaluation repose sur les résultats de la couche précédente. Ces couches, qui n'affichent ni entrées ni sorties visibles, permettent une évaluation et un retraitement successifs des données jusqu'à l'obtention d'un résultat final.

Lors de l'analyse d'une image de coloscopie destinée à la détection de polypes, l'image est d'abord multipliée et soumise à divers filtres pour traitement. Chaque filtre génère un score qui est ensuite transmis à la couche suivante, incluant des filtres de couleur et de détection des contours. Ce processus se déroule à travers plusieurs couches de traitement, caractéristique de l'apprentissage profond, jusqu'à obtenir un résultat final, tel qu'un diagnostic ou l'identification d'un polype. [19]

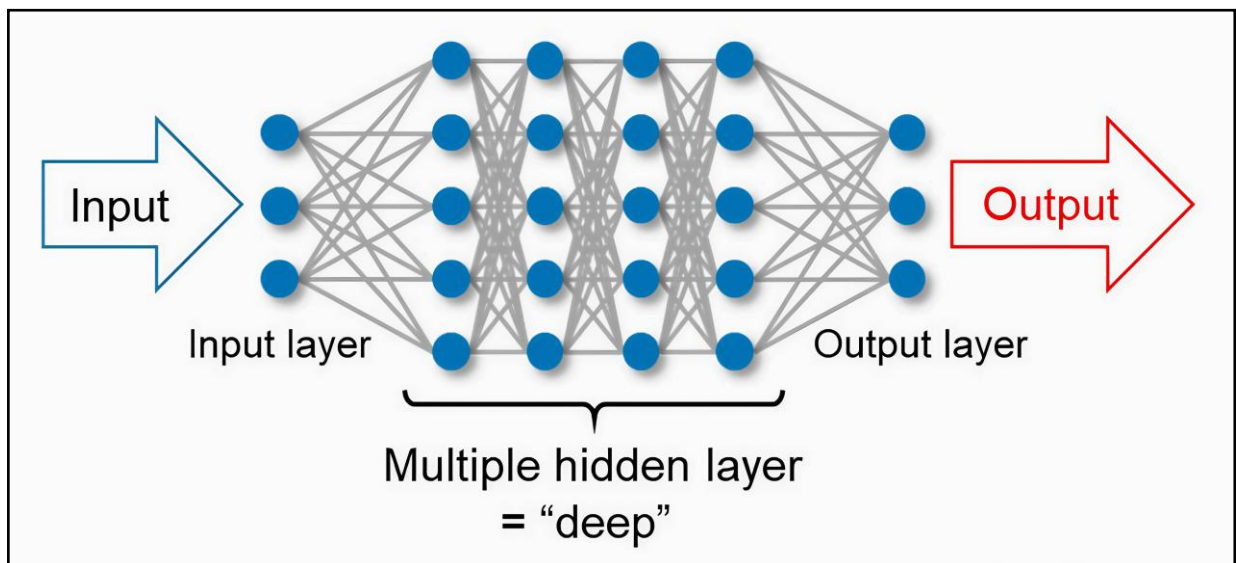


Figure 4. Apprentissage profond ou deep learning. [20]

L'apprentissage automatique est largement utilisé dans d'autres types de technologies d'intelligence artificielle, telles que le traitement du langage naturel (NLP), la technologie vocale et la robotique.

2.7. Les Réseaux De Neurones Convolutifs (CNN) :

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) constituent des modèles d'apprentissage profond spécifiquement conçus pour traiter des données organisées sous forme de grille, comme les images médicales.

Inspirés par la structure du cortex visuel humain, ces réseaux sont capables d'apprendre de manière autonome et adaptative les hiérarchies de caractéristiques, allant des éléments simples aux structures plus complexes.

Un réseau de neurones convolutifs (CNN) est composé de trois types de couches : les couches de convolution, de pooling et les couches entièrement connectées. Les couches de convolution et de pooling s'occupent de l'extraction des caractéristiques (input), tandis que la couche entièrement connectée transforme ces caractéristiques en une sortie finale (output). [21]

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN), sont particulièrement efficaces pour accomplir des tâches complexes de reconnaissance d'objets visuels et l'intégration de réseaux de neurones à mémoire à long terme (LSTM) a permis d'enrichir le traitement visuel avec une capacité de mémoire, améliorant les performances d'analyse et la compréhension des étapes chirurgicale.[22]

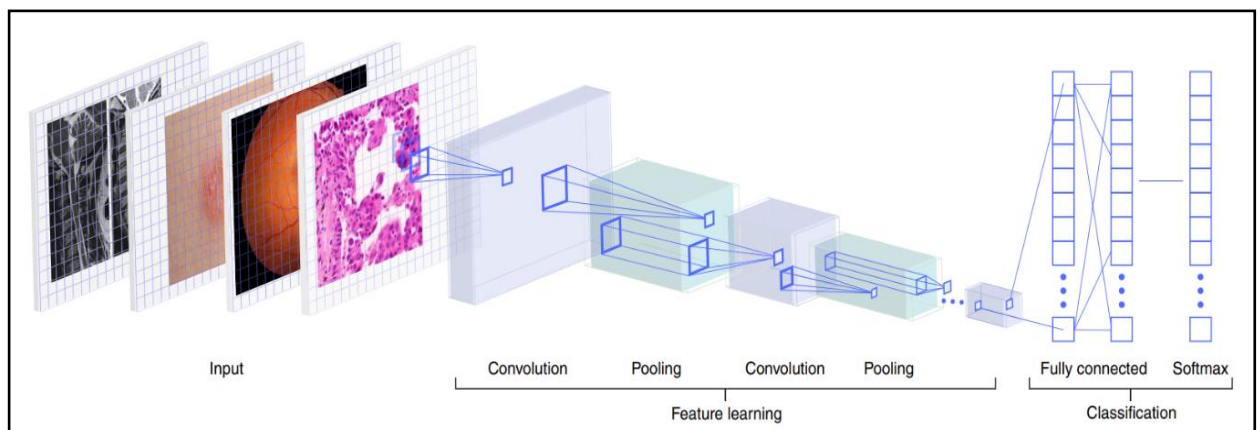


Figure 5. Classification des images et localisation des anomalies, par réseaux de neurones convolutifs avec process de transformation des données via les couches de convolution et de pooling. [23]

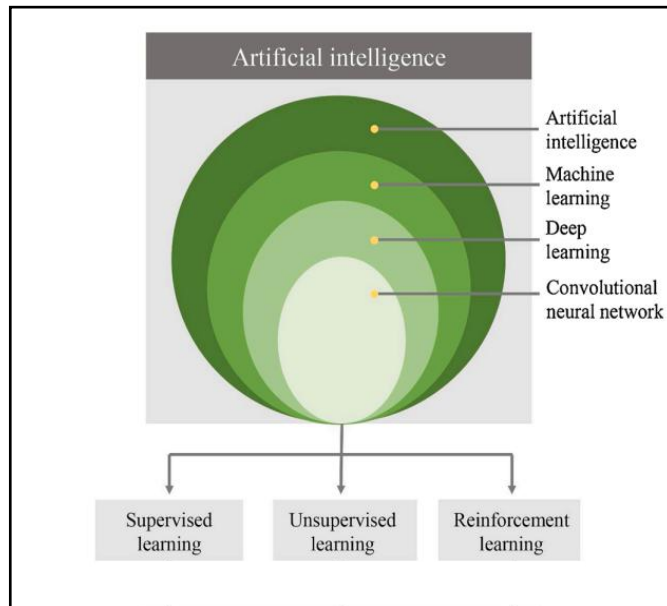


Figure 6. Les relations hiérarchiques entre l'intelligence artificielle (AI) l'apprentissage automatique (machine learning), l'apprentissage profond (deep learning) et les réseaux de neurones convolutifs (CNN). [24]

2.8. Le Traitement Du Langage Naturel (Natural Language Processing ou NLP) :

Le traitement du langage naturel (Natural Language Processing ou NLP) est une branche de l'intelligence artificielle qui s'est développée rapidement au cours des deux dernières décennies, en parallèle avec l'adoption croissante des technologies informatiques.

Le NLP se définit comme l'analyse du langage humain naturel effectuée par des systèmes informatiques. Son principal objectif est de traiter les textes ou les données vocales non pas simplement comme des suites de caractères, de phrases ou de paragraphes, mais comme des structures complexes intégrant des dimensions syntaxiques et phonologiques. Grâce à cela, les modèles d'IA peuvent extraire des concepts ou des significations et produire des résultats quantitatifs. Un modèle, dans ce contexte, correspond à un ensemble d'algorithmes et d'hypothèses nécessaires pour tirer des conclusions sur des données non observées à partir de données connues. [25]

2.9. Les Agents Conversationnels Et Les Chatbots : :

- **Agent conversationnel** : C'est un système de dialogue capable de comprendre et de générer du contenu en langage naturel, en utilisant du texte, la voix ou des gestes, comme la langue des signes.
- **Chatbot** : C'est un agent conversationnel capable de comprendre et de générer des réponses en utilisant une interface textuelle.

Les développements technologiques actuels permettent l'utilisation croissante des agents conversationnels dans plusieurs domaines, tels que les agents d'assistance dans l'éducation et le système de santé, les agents de support client dans le domaine commercial, et les agents conversationnels commerciaux à usage personnel, comme Siri d'Apple et Cortana de Microsoft, sont largement utilisés dans le monde entier. [26]

L'un des fameux agent conversationnel aujourd'hui est l'agent ChatGPT. Lancé en novembre 2022, ChatGPT est un chatbot développé par OpenAI .il est fondé sur l'architecture de transformateur génératif pré-entraîné (GPT). Il est capable de produire des réponses semblables à celles des humains en réponse à des entrées textuelles et vocales. [27]

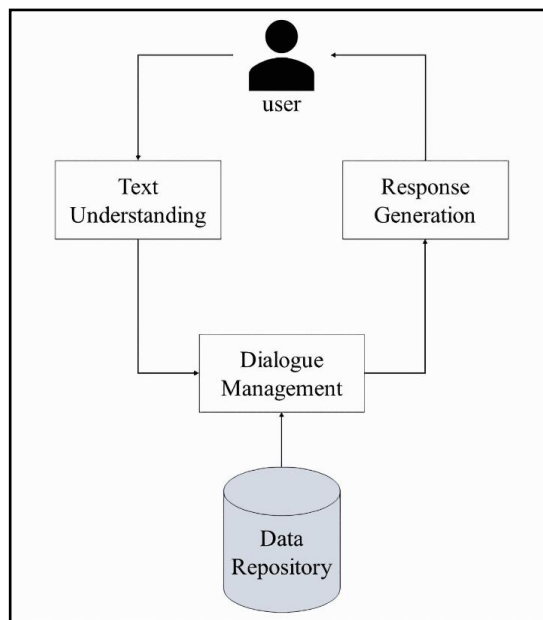


Figure 7. Architecture d'un agent conversationnel. [28]

2.10. La Vision par Ordinateur (Computer Vision ou CV) :

La vision par ordinateur est un sous-domaine de l'intelligence artificielle qui vise à développer des algorithmes et des techniques pour interpréter les informations issues d'images et de vidéos.

La vision par ordinateur a fait des progrès notables, notamment grâce aux innovations en informatique, à l'avènement des caméras numériques, à l'amélioration des modèles mathématiques et, plus récemment, aux avancées des techniques d'apprentissage profond. [29]

La vision par ordinateur permet de segmenter les images chirurgicales pour identifier les structures anatomiques, reconnaître les instruments chirurgicaux, et détecter des actions chirurgicales. Leur utilisation en salle d'opération pourrait améliorer la surveillance en temps réel et soutenir la prise de décision, contribuant ainsi à accroître la sécurité des patients et à optimiser les résultats cliniques. [30]

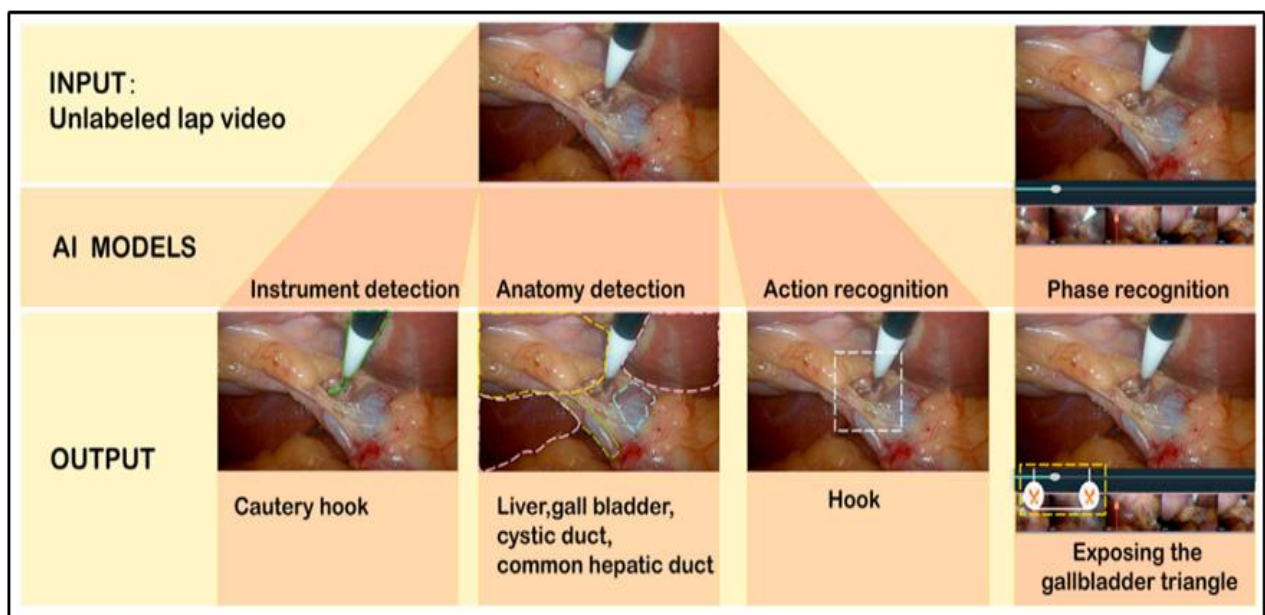


Figure 8. Les applications de la vision par ordinateur en chirurgie laparoscopique. [31]

2.11. Le Robot:

Le terme « robot » a été introduit en 1921 par Joseph Čapek et dérive du mot tchèque « robota », signifiant « travail ». Initialement, il faisait référence à un humain artificiel, conçu comme un dispositif doté de capacités physiques et intellectuelles. Par la suite, le concept a évolué pour désigner une machine capable d'accomplir des tâches répétitives et mécaniques, marquant ainsi le début de l'automatisation.

Aujourd'hui, ce concept s'incarne dans les robots chirurgicaux intégrant l'intelligence artificielle. Ces robots, équipés de capteurs avancés, de caméras et d'outils d'imagerie sophistiqués, collectent et analysent des données en temps réel pour prendre des décisions autonomes et exécuter des interventions avec une précision accrue. Ils améliorent ainsi l'efficacité et la sécurité en salle d'opération.

Plus largement, l'IA permet aux robots d'apprendre de leur environnement, de s'adapter à des situations variées et de gérer des tâches complexes, transformant des outils rigides en dispositifs flexibles et polyvalents. [32] [33]

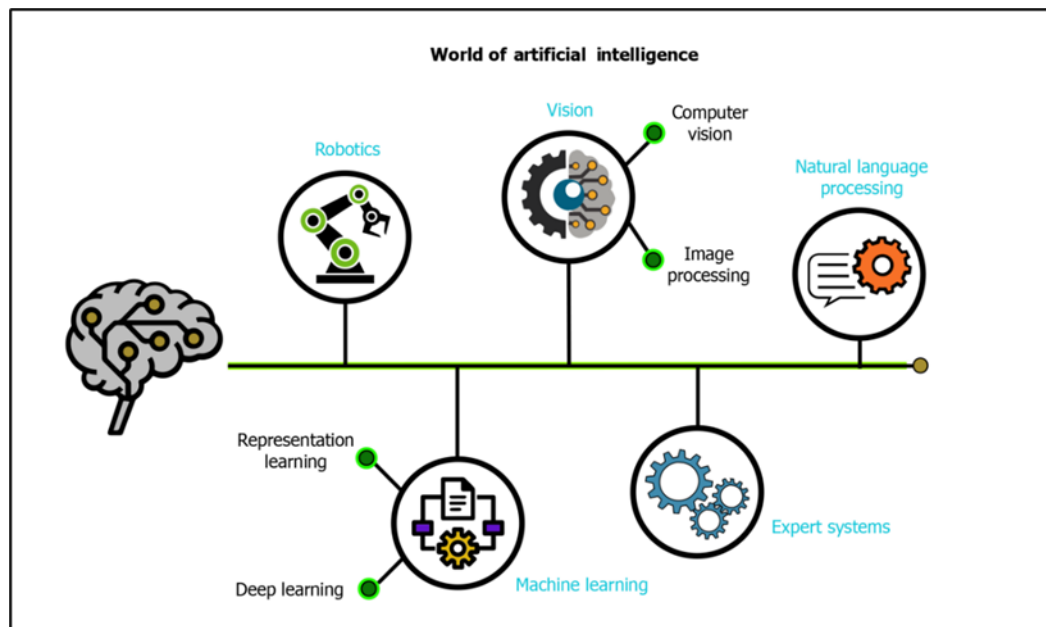


Figure 9. Les composantes clés du monde de l'intelligence artificielle. [34]

2.12. La Blockchain:

Une blockchain est une base de données distribuée sur plusieurs sites et participants. Les nouvelles données sont d'abord regroupées dans un bloc, qui est ensuite associé à une clé de hachage (hash key) du bloc précédent via une technique cryptographique. Chaque nouveau bloc est ainsi lié à ses prédécesseurs, formant une chaîne, d'où le terme blockchain.

La technologie blockchain peut améliorer la gestion des données en la rendant plus sécurisée, transparente et équitable. Elle est souvent utilisée pour les dossiers médicaux électronique, offrant des avantages en matière de contrôle et de propriété des données. [35]

2.13. Le Cloud :

Le Cloud ou le stockage en cloud repose principalement sur l'association de nombreux dispositifs de stockage interconnectés, formant un volume de stockage important pour répondre aux besoins d'infrastructures informatiques étendues.

La technologie du stockage en cloud présente plusieurs avantages, notamment une transmission rapide, une excellente capacité de partage, une grande capacité de stockage, un coût réduit, un accès simplifié et une association dynamique. [36]

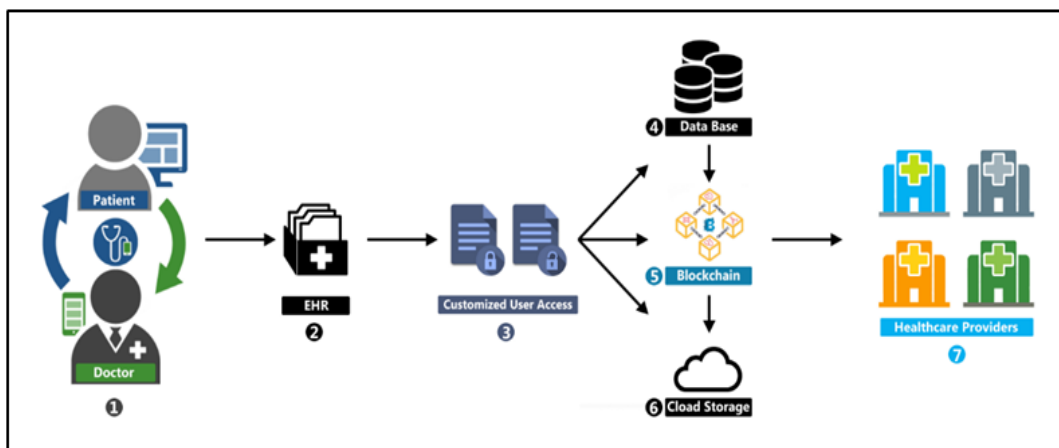




Figure 10. La gestion des données dans la blockchain et stockage dans le cloud. [36]



*L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE
EN CHIRURGIE VISCERALE*



I. La Chirurgie Viscérale :

1. Définition et Evolution :

La chirurgie viscérale dérive du mot latin viscera, qui désigne "les organes". Ce domaine chirurgical englobe tous les organes du système digestif, y compris l'œsophage, l'estomac, le foie, les voies biliaires, le pancréas, ainsi que l'intestin grêle, le gros intestin et l'anus. [37]

La chirurgie viscérale a connu une évolution significative, passant des premières interventions primitives aux techniques hautement spécialisées actuelles. Dans le passé, cette discipline comportait de nombreux risques en raison d'une compréhension limitée de l'anatomie, de l'absence d'anesthésie efficace et du manque de méthodes antiseptiques. Toutefois, au fil des siècles les progrès technologiques ont permis de transformer cette spécialité, la rendant ainsi incontournable dans la pratique chirurgicale moderne.

Depuis les premières approches rudimentaires pour traiter les hernies et les traumatismes dans l'Égypte ancienne, la Grèce et Rome, jusqu'à l'avènement de la chirurgie laparoscopique au XXe siècle, l'histoire de la chirurgie viscérale reflète une quête constante visant à optimiser les résultats cliniques tout en réduisant les risques opératoires. [38]

Le 19^e siècle a constitué une époque révolutionnaire pour la chirurgie viscérale, marquée par des découvertes majeures ayant permis l'élaboration de nouvelles stratégies thérapeutiques.

Cette période a été décisive, d'une part, par l'amélioration substantielle des techniques chirurgicales, et d'autre part, par une compréhension approfondie des mécanismes infectieux et des moyens de prévention. En outre, l'introduction de l'anesthésie et de l'antisepsie a facilité la réalisation d'interventions chirurgicales plus complexes, entraînant ainsi une augmentation significative des taux de succès. Des découvertes fondamentales, telles que l'appendicectomie, le traitement des obstructions intestinales et des hernies, ont profondément transformé la discipline, établissant ainsi les bases de la chirurgie viscérale moderne. [38]

2. Techniques Actuelles Au Sein De Service De Chirurgie Viscérale :CHU Med VI :

2.1. La Laparotomie :

Le terme laparotomie provient des mots grecs lapara, signifiant "flanc", et tomy, dérivé de tomē, signifiant "coupe".

En pratique chirurgicale, cela se traduit par une grande incision dans l'abdomen pour accéder à la cavité péritonéale. Habituellement, une laparotomie standard consiste en une incision réalisée sur la ligne médiane le long de la linea alba. [39]

Sur le plan technique, l'intervention débute par une dissection méthodique des différentes couches de la paroi abdominale (la peau, le tissu sous-cutané, la fascia superficialis, les muscles abdominaux " droit de l'abdomen, obliques et transverse ", la fascia transversalis jusqu'à l'ouverture du péritoine. Une fois la cavité abdominale explorée, le chirurgien peut visualiser, manipuler et traiter les organes abdominaux de manière directe, ce qui constitue un avantage considérable pour des gestes chirurgicaux de haute précision.

Le choix du type d'incision — qu'elle soit médiane, transversale ou paramédiane — est guidé par plusieurs facteurs, notamment l'indication opératoire, la morphologie du patient et l'expérience du chirurgien.

Les indications de la laparotomie sont variées et concernent de nombreuses disciplines. En chirurgie viscérale, elle est fréquemment indiquée pour les résections digestives, les appendicectomies compliquées ou encore les explorations en contexte de diagnostic incertain.

Par ailleurs, elle constitue un outil indispensable en traumatologie abdominale, notamment dans la gestion des hémorragies internes ou des lésions viscérales complexes.

Dans le contexte actuel, marqué par une volonté de réduction de l'agressivité chirurgicale, la laparotomie conserve toute sa légitimité. En effet, elle demeure la voie d'abord privilégiée lorsqu'un accès rapide ou une exploration complète de la cavité abdominale sont nécessaires. [40]

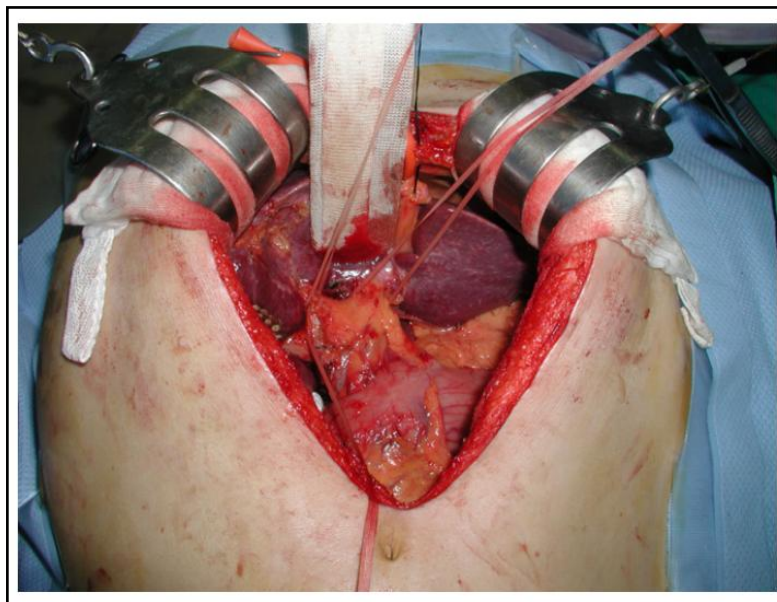


Figure 11. Hépatectomie avec une incision médiane supérieure au-dessus de l'ombilic. [41]

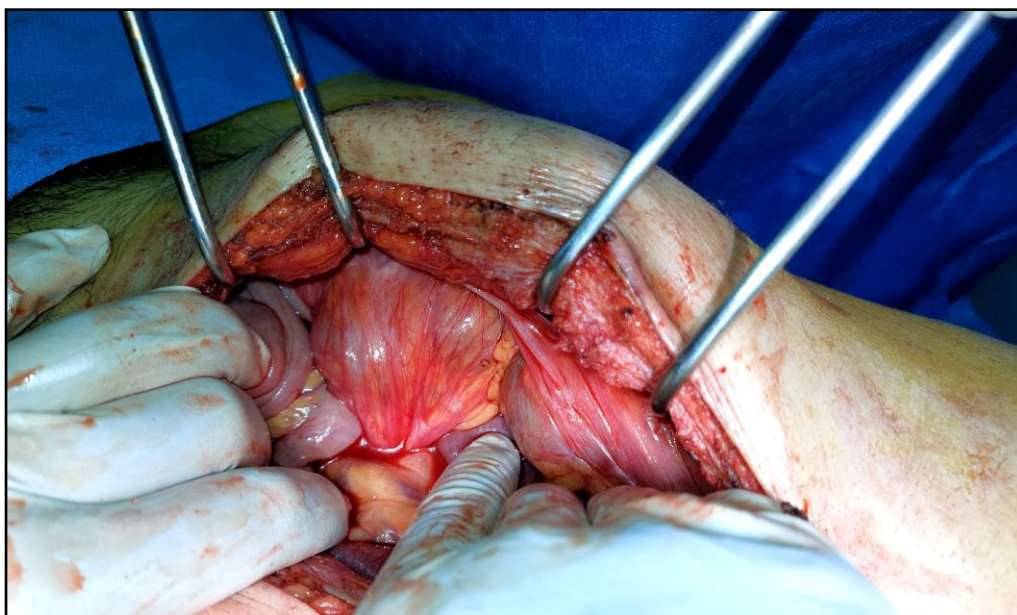


Figure 12. Vue peropératoire lors d'une laparotomie (images prises au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).

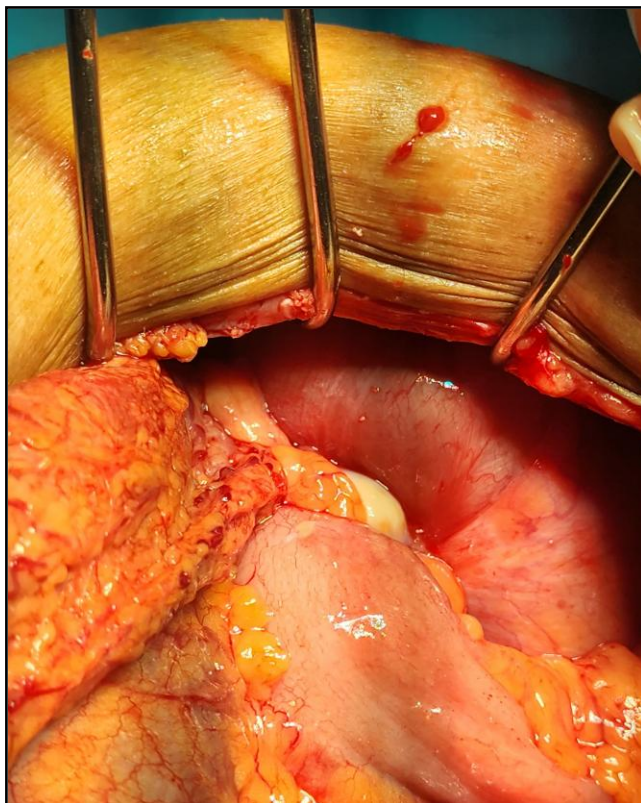


Figure 13. Vue peropératoire lors d'une laparotomie (images prises au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).



Figure 14. Plaie opératoire après laparotomie (images prises au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).

2.2. La Laparoscopie :

La laparoscopie, également désignée sous le terme de cœlioscopie, constitue une technique chirurgicale mini-invasive largement adoptée dans la pratique chirurgicale moderne.

Elle permet d'accéder à la cavité abdominale à des fins diagnostiques ou thérapeutiques, en réduisant les traumatismes pariétaux inhérents aux techniques conventionnelles telles que la laparotomie. Elle repose sur l'utilisation d'un endoscope, dispositif composé d'un tube optique associé à un système d'éclairage et à une caméra, permettant la visualisation en temps réel des structures intra-abdominales sur un moniteur.

L'intervention débute par la réalisation d'une petite incision, le plus souvent au niveau de l'ombilic, à travers laquelle l'endoscope est introduit. Afin d'optimiser les conditions opératoires, du dioxyde de carbone est insufflé dans la cavité péritonéale, générant un pneumopéritoine qui permet de soulever la paroi abdominale et d'offrir un espace de travail adéquat.

Le choix du dioxyde de carbone repose sur ses propriétés physico-chimiques : il est non inflammable, rapidement absorbé par les tissus, et éliminé aisément par les voies respiratoires.

Une fois la cavité distendue, plusieurs trocarts sont insérés permettant l'introduction d'instruments chirurgicaux tels que des pinces, ciseaux, dispositifs de dissection, de coagulation ou de suture. [42]



Figure 15. Positionnement des trocarts au cours d'une Appendicectomie (image prise au sein du service de chirurgie viscérale du CHU Mohammed VI).

Comparée à la chirurgie ouverte, la laparoscopie présente de nombreux avantages cliniques. Elle est associée à une réduction significative de la douleur postopératoire, du risque infectieux et des complications pariétales, telles que les abcès de paroi ou les éventrations, notamment chez les patients obèses.

Elle diminue également l'incidence des adhérences intra-abdominales, tout en réduisant la durée d'hospitalisation, le délai de reprise des activités quotidiennes et la durée de l'arrêt de travail. Par ailleurs, le résultat esthétique est souvent jugé supérieur en raison de la taille réduite des incisions cutanées.

Les indications de la laparoscopie sont aujourd'hui bien codifiées. Elle est notamment indiquée dans l'appendicectomie, la cholécystectomie, la cure des hernies pariétales, le traitement du reflux gastro-œsophagien, la chirurgie bariatrique, les résections coliques pour pathologies bénignes ou malignes, ainsi que dans certaines splénectomies, pancréatectomies, hépatectomies et gastrectomies oncologiques. [42]

Les approches chirurgicales traditionnelles, qu'elles soient ouvertes ou mini-invasives, ont considérablement évolué, contribuant à améliorer la prise en charge des pathologies viscérales. Toutefois, face à la complexité croissante des cas cliniques et à l'exigence d'une chirurgie toujours plus précise, ces techniques atteignent parfois leurs limites.

Dans ce contexte, l'émergence de l'intelligence artificielle représente une nouvelle opportunité pour enrichir la pratique chirurgicale. En apportant des outils d'aide à la décision, de prédiction, ou encore d'assistance opératoire, l'IA s'impose comme un allié prometteur dans la transformation de la chirurgie viscérale contemporaine.

II. L'Intégration de l'Intelligence Artificielle en Chirurgie Viscerale :

L'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale, en particulier à travers les méthodes d'apprentissage automatique, offre un potentiel considérable pour optimiser la prise en charge et améliorer les résultats post opératoires.

L'utilisation de ces méthodes intelligentes pour l'acquisition, l'organisation, l'analyse et la modélisation des vastes quantités de données générées tout au long du parcours des soins chirurgicaux permet de générer des prédictions qui peuvent orienter les décisions chirurgicales et proposer des actions autonomes et personnalisées.

Ces actions incluent le soutien durant les différentes phases de la prise en charge chirurgicale : la phase préopératoire, intra-opératoire et post opératoire.

1. La Phase Pré Opératoire :

1.1. Le Diagnostic Automatique et les Systèmes d'Aide à la Décision (SAD) :

Le diagnostic est crucial pour reconnaître une maladie et permettre une prise en charge adaptée, constituant ainsi un élément fondamental de la décision chirurgicale. La reconnaissance d'un syndrome ou d'une pathologie précède généralement une gestion optimale des patients.

Le raisonnement clinique, basé sur l'analyse et la hiérarchisation des symptômes rapportés lors de l'interrogatoire et des signes observés à l'examen clinique, demeure la méthode centrale de la pratique médicale quotidienne.

Par ailleurs, les examens complémentaires, tels que la biologie, l'imagerie médicale et la génétique, doivent idéalement être sollicités dans un second temps afin d'optimiser l'efficacité tout en préservant les ressources en temps et en moyens. [43]

Dans ce contexte, les techniques d'analyse avancée, d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle ouvrent de nouvelles perspectives en permettant de transformer les différents types de données obtenues durant le processus de diagnostic en informations exploitables.

Ces techniques favorisent la prise de décision, améliorent la qualité des soins aux patients, permettent une réactivité en temps réel et contribuent à sauver des vies. [44]

La notion de diagnostic automatique ne peut être envisagée sans aborder le rôle des systèmes d'aide à la décision (SAD), qui sont essentiels dans l'automatisation du processus diagnostic.

Un système d'aide à la décision (SAD) est un système qui vise à améliorer la prise en charge des patients en fournissant des recommandations fondées sur des connaissances spécialisées, des informations sur les patients et d'autres données pertinentes.

Un SAD traditionnel se définit comme un logiciel qui soutient la prise de décision clinique en associant les caractéristiques d'un patient à une base de données cliniques informatisée, générant des évaluations ou recommandations personnalisées pour le chirurgien.

Actuellement, les SADs sont principalement utilisées pour aider les chirurgiens à intégrer leurs connaissances cliniques avec celles fournies par le système. Ces outils sont essentiels dans l'optimisation des décisions chirurgicales, en particulier dans des contextes complexes.

De plus, avec l'évolution des technologies, les SADs actuels sont capables de traiter des données complexes que l'humain ne pourrait pas analyser ou obtenir de manière autonome. [45]

Les SADs sont souvent divisées en deux catégories : Ceux basés sur des connaissances et ceux non basés sur des connaissances (knowledge-based or non-knowledge based).

❖ **Les systèmes non basés sur des connaissances (non-knowledge based) :**

S'appuient sur l'apprentissage automatique pour prendre des décisions, plutôt que d'être programmés selon des connaissances médicales préalablement établies.

❖ Les systèmes basés sur des connaissances (knowledge-based) :

Dans ce type de système, des règles de programmation informatique de type "SI-ALORS" (IF-THEN) sont définies, permettant au système de récupérer les données nécessaires pour évaluer ces règles et produire des actions ou recommandations. Ces règles peuvent être formulées à partir de données issues de la littérature, des pratiques ou des besoins spécifiques du patient.

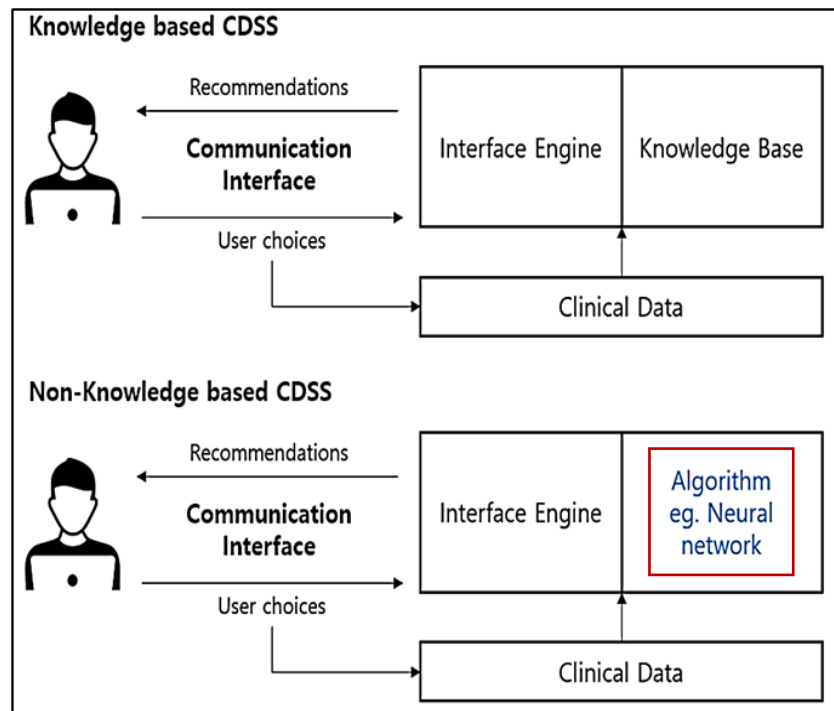


Figure 16. La différence entre les systèmes basés sur des connaissances et ceux non basés sur des connaissances (knowledge-based or non-knowledge based). [46]

En général tous les systèmes d'aide à la décision partagent des éléments de base. Ils couvrent une vaste gamme de fonctions, telles que le diagnostic, la gestion des maladies, la prescription des médicaments, le suivi thérapeutique, et bien plus encore. [45]

En conclusion, ces systèmes d'aide au diagnostic sont conçus pour aider les chirurgiens à établir des diagnostics en filtrant les données saisies et en proposant une liste de diagnostics probables ou possibles.

1.1.1. L'Interrogatoire Intelligent :

La collecte de données complètes et la prise des antécédents médicaux et chirurgicaux d'un patient est essentielle pour un diagnostic précis. Cette collecte se fait via des formulaires papier ou des entretiens avant et/ou pendant la visite d'un patient, suivis d'une saisie manuelle dans les dossiers médicaux.

Souvent, des données sont manquantes ou de mauvaise qualité en raison du manque de temps ou de formation, du grand nombre de patients ou de la mauvaise communication. Ces lacunes d'information peuvent entraîner des erreurs ou des retards dans le diagnostic mettant en jeu la vie des patients.

Les avancées récentes dans les agents conversationnels alimentés par l'IA et le traitement du langage naturel montrent un potentiel prometteur pour compléter les méthodes humaines actuelles de collecte des antécédents personnels et familiaux. [47]

Actuellement, un nombre croissant d'entreprises et de start-ups se consacrent au développement d'outils d'anamnèse intelligentes. Ce domaine a donné lieu à l'émergence de différentes catégories d'agents conversationnels, tels que les chatbots, les agents conversationnels incarnés (avatars) et les assistants vocaux.

Dans le domaine médico-chirurgical, un chatbot se base sur de l'extraction des symptômes et à la mise en correspondance de ces symptômes sous forme des mots-clés prédéfinis dans la base de données. Durant ce processus, chaque symptôme est comparé aux symptômes de maladies courantes stockées dans la base de données.

Une fois le premier symptôme vérifié, le suivant est examiné jusqu'à ce qu'une correspondance soit trouvée. Une liste restreinte de maladies est ensuite générée en fonction des réponses fournies par les utilisateurs lors de l'évaluation des questions.

Enfin, le chatbot identifie et spécifie la maladie la plus probable à l'utilisateur final. [48]

Parmi les fameux chatbots et agents conversationnels présents :

- **ELIZA :**

Le premier agent conversationnel qui a été développée en 1964 par Weizenbaum. ELIZA avait été conçue pour servir de psychologue et imitait certains types de conversation en langage naturel entre humains et ordinateurs. Les gens croyaient à tort qu'ELIZA était suffisamment intelligente pour comprendre une conversation. [49]

- **QURO :**

Un agent conversationnel conçu pour engager les utilisateurs à travers une interaction structurée qui permet une recueille des informations démographiques et médicales essentielles (le genre, l'âge, le statut tabagique, antécédents ...) ainsi qu'une extraction des symptômes et une évaluation des affections pour fournir un pré-synopsis. [50]

- **MANDY :**

Conçu pour assister le personnel de santé en automatisant le processus d'admission des patients. Il interagit avec le patient en menant un entretien, en comprenant ses plaintes principale, et en soumettant des rapports aux médecins pour une analyse plus approfondie. [51]

- **ADA HEALTH :**

Utilise une interface conversationnelle pour collecter les informations démographiques de base des utilisateurs, leurs symptômes principaux, ainsi que des détails tels que la durée et l'intensité des symptômes. Un algorithme d'IA analyse ces données pour générer des diagnostics probables et des recommandations de triage adaptées. [52]

- **BABYLON HEALTH :**

Un service rapide et à la demande pour les patients sans problèmes de santé graves. Il collecte des symptômes de maladies et analyse les dossiers de santé des patients, y compris les notes des médecins, en les comparant avec une base de données de symptômes similaires.

Avec possibilité de contacter un médecin en cas de besoin ponctuel. Depuis 2017, ce service est proposé par le Service National de Santé du Royaume-Uni (NHS) aux patients près de Londres et de Birmingham pour des consultations en ligne. [53]

▪ CHAT ELLA :

Un système intelligent conçu pour dialoguer avec les patients, en explorant en détail les symptômes afin de fournir des diagnostics préliminaires. Les résultats expérimentaux ont montré que le modèle atteint un taux de précision de 97,50 % sur l'ensemble de validation.

De plus, une enquête de satisfaction a révélé que 68,7 % des utilisateurs approuvaient Chat Ella et que 45,3 % trouvaient que le système simplifiait les consultations quotidiennes. [54]

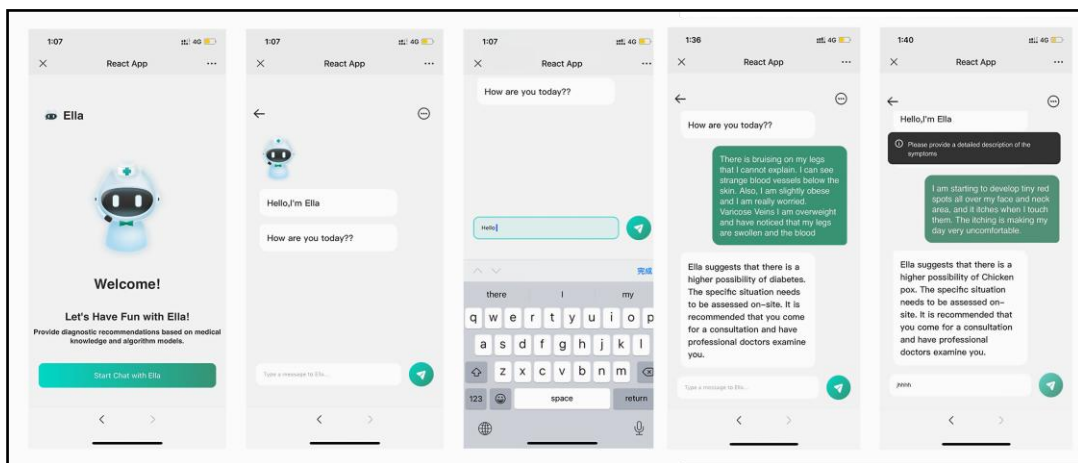


Figure 17. Screenshots de l'interface utilisateur du système de dialogue Chat Ella. [54]

Avec la présence de plusieurs exemples d'agents conversationnels qui peuvent mener un interrogatoire avec un patient ainsi, cette capacité de prédiction et proposition d'une tels pathologies convenables, a mis en évidence les capacités innovantes de ces systèmes intelligents comme aide réel pour les médecins en général et pour les chirurgiens spécialement.

1.1.2. Examens Paracliniques :

a. Intelligence Artificielle et Imagerie :

Les algorithmes d'apprentissage profond ont récemment connu un essor, attribuable à trois facteurs principaux : la disponibilité de données, la puissance de calcul accrue grâce à l'utilisation des unités de traitement graphique (GPU) et le développement rapide de nouveaux algorithmes.

Ces algorithmes d'intelligence artificielle ayants révolutionner l'imagerie médicale, en optimisant l'interprétation des radiographies, scanners et IRM pour une détection plus précoce et précise des pathologies, augmentant ainsi l'efficacité diagnostique. [55]

Les tâches réalisées par ces algorithmes comprennent 3 taches essentiels :

▪ **La classification :**

La classification des images radiologiques visant à détecter la présence ou l'absence d'anomalies, évaluer des anomalies comme bénignes ou malignes, et classifier des lésions cancéreuses en fonction de leurs caractéristiques histopathologiques et génomiques etc. [55]

▪ **La détection :**

Consiste à identifier la présence ou l'absence d'un objet d'intérêt ainsi que sa localisation au sein d'une image. Contrairement aux tâches de classification, la détection d'objets en est encore à ses débuts. Le résultat de ces algorithmes est généralement l'image d'origine avec un objet localisé, par exemple, une boîte englobante autour de l'objet identifié ou des cartes de chaleur qui le délimitent imparfaitement.[56]

▪ **La segmentation :**

La segmentation d'images consiste à diviser l'image en différentes régions, telles que des organes, des lésions ou des sous-volumes dans les images médicales. C'est une étape essentielle dans l'analyse quantitative des images, que ce soit pour l'extraction de caractéristiques ou la classification. Les tâches de segmentation sont généralement plus complexes que la classification et la détection d'objets, car l'ordinateur doit classer chaque pixel et l'étiqueter. [56]

La plupart des applications de l'apprentissage profond en radiologie se concentrent sur la classification, la segmentation et la détection, mais d'autres applications existent selon les problèmes à résoudre lors de l'analyse des images tels que : l'enregistrement, la génération, la reconstruction et l'amélioration d'images. [55]

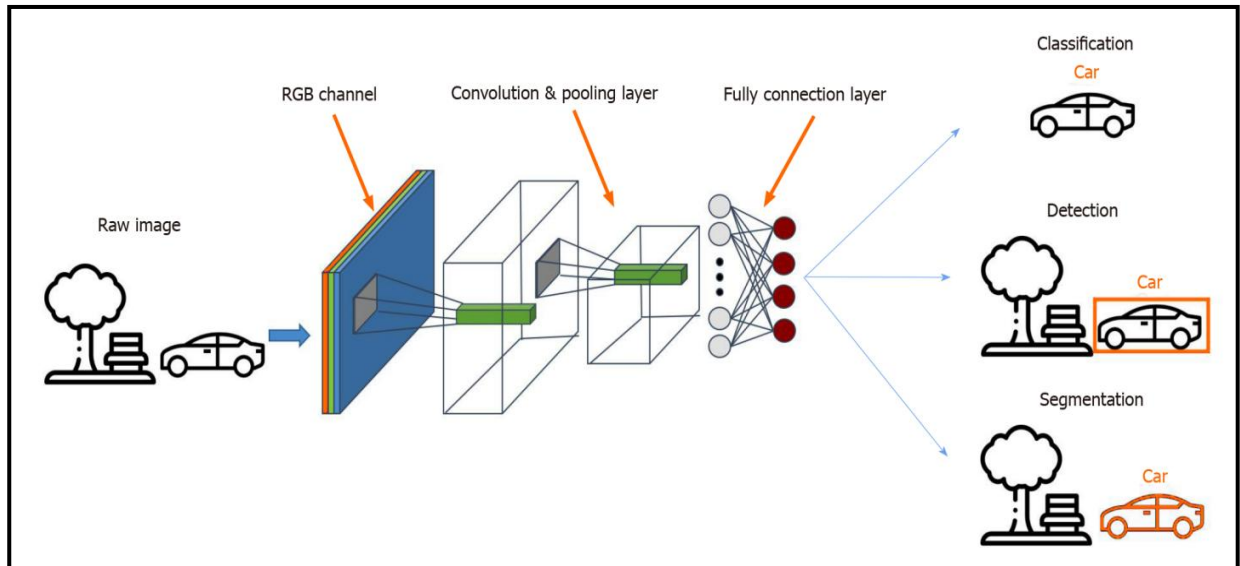


Figure 18. Illustration d'un réseau de neurones convolutifs avec une couche d'entrée, plusieurs couches cachées et une couche de sortie avec les tâches de détection, de segmentation et de classification de motifs d'images. [57]

❖ La Radiographie Standard / ASP :

En raison du nombre élevé d'examens radiographiques réalisés quotidiennement, la radiographie est une cible privilégiée pour le développement et l'implémentation de solutions d'intelligence artificielle. [58]

Les radiographies thoraciques sont l'examen d'imagerie médicale le plus couramment réalisé. [59]

▪ CheXNeXt :

CheXNeXt est un réseau de neurones convolutifs développé par le groupe d'Andrew Ng à l'Université de Stanford. Il est capable de détecter simultanément la présence de 14 pathologies différentes, dont la pneumonie, l'épanchement pleural, les masses pulmonaires et les nodules sur les radiographies thoraciques en vue frontale. Le temps moyen d'interprétation de 420 images était considérablement plus long pour les radiologues (240 minutes) que pour CheXNeXt (1,5 minute). [60]

▪ Occlusion intestinale :

Un outil d'aide au diagnostic, basé sur un modèle de réseau de neurones convolutifs (CNN), a été implémenté pour l'analyse automatisée des images radiologiques.

Ce système vise à détecter les cas suspects d'obstruction intestinale avec une sensibilité de 91 % et une spécificité de 93 %, offrant ainsi une assistance précise aux radiologues et chirurgiens. [61]

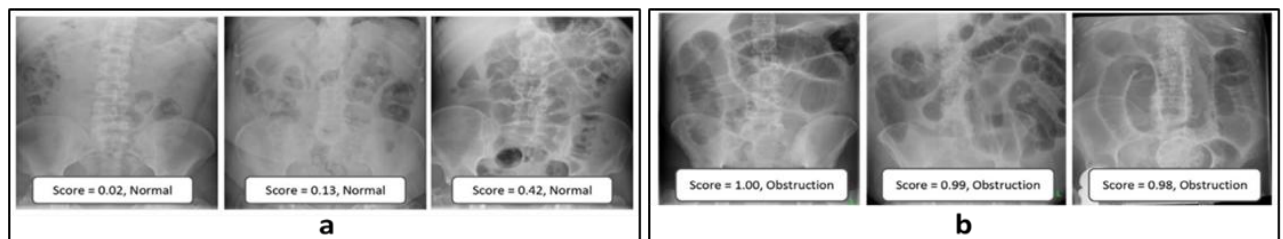


Figure 19. Exemples d'images correctement catégorisées par le modèle : Des apparences normales : (a) et la détection des obstructions : (b) (Les scores du modèle et les prédictions sont affichés dans des encadrés au bas de chaque image). [61]

▪ Pneumopéritoine :

Le pneumopéritoine, défini par la présence anormale d'air dans la cavité péritonéale, est principalement dû à une perforation gastro-intestinale, à une intervention chirurgicale abdominale ou à une ventilation mécanique. Bien que la tomodensitométrie abdominale (TDM) offre une précision diagnostique supérieure à celle de la radiographie standard pour détecter l'air intrapéritonéal libre, des considérations cliniques, telles que l'état de santé et la douleur du patient, peuvent limiter son utilisation en tant qu'outil de première intention. [62]

La radiographie abdominale sans préparation (ASP) constitue une modalité d'imagerie rapide et accessible. Toutefois, en position debout, elle présente des limitations pour les patients en état de faiblesse, pouvant rendre cette position difficile à maintenir.

Dans de tels cas, la radiographie en position couchée est employée pour la détection du pneumopéritoine. Cependant, l'accumulation non spécifique de l'air libre en position couchée complique l'interprétation, nécessitant une expertise accrue pour une analyse précise.

Pour pallier ces limitations, un modèle d'apprentissage profond a été développé afin de détecter avec précision le pneumopéritoine sur les radiographies abdominales en positions couchée et debout. Lors de la validation, ce modèle a démontré une capacité à distinguer l'air intrapéritonéal de l'air intestinal, un aspect essentiel pour un diagnostic précis en position couchée.

Les performances du modèle en termes de sensibilité et de spécificité ont été respectivement de 85,4 % et 73,3 % pour la position couchée, et de 91,1 % et 95,0 % pour la position debout.

En comparaison avec les experts, la supériorité du modèle a été notable pour la détection de pneumopéritoine en position couchée, où sa sensibilité était nettement supérieure à celle des spécialistes de l'abdomen et des résidents, avec des intervalles de confiance non chevauchants.[62]

Prenant deux cas durant lesquels le modèle proposé a fourni des résultats corrects tant que le spécialiste a échoué.

Dans le premier cas (A) le spécialiste confond l'air libre (flèches) dans le quadrant supérieur gauche avec l'air présent dans l'intestin, tandis que le modèle discrimine correctement l'air libre de l'air intestinal, indiquant une probabilité de pneumopéritoine de 88,4 %.

Pour le deuxième cas (B) le spécialiste est induit en erreur par une forme atypique d'accumulation d'air (flèches) dans l'estomac, qui imite de l'air libre sous le diaphragme gauche en position debout, produisant ainsi un faux positif pour le pneumopéritoine.

En revanche, le modèle proposé ne se laisse pas tromper par cet air atypique, et indique une faible probabilité de pneumopéritoine de 2,2 %. [62]

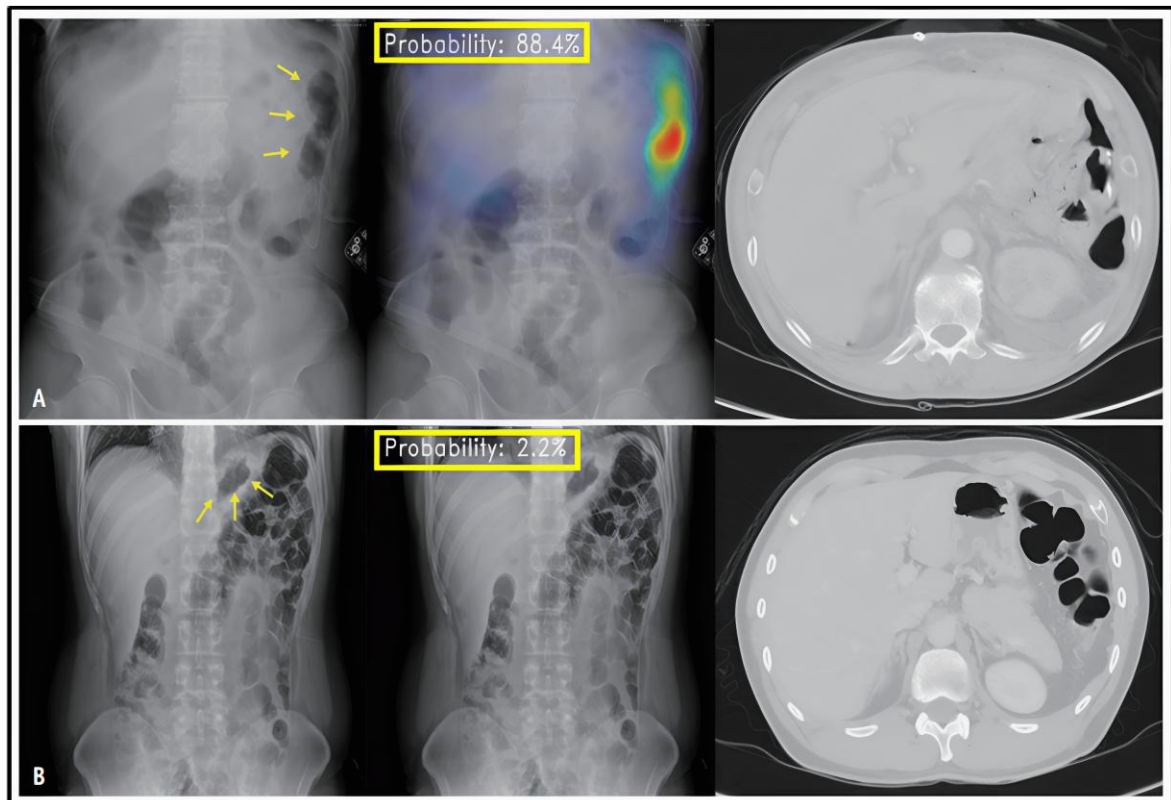


Figure 20. (A) et (B) : Deux radiographies abdominales sans préparation (ASP) interprétées par le modèle proposé avec probabilité de présence d'un pneumopéritoine (à gauche) avec confirmation des résultats par TDM (à droite). [62]

▪ **Invagination intestinale :**

L'invagination intestinale est une cause fréquente de douleur abdominale aiguë chez l'enfant et constitue la principale cause d'obstruction intestinale chez les jeunes enfants. Elle survient lorsqu'un segment de l'intestin s'invagine dans un segment adjacent. Sans traitement, cette condition peut entraîner une ischémie, évoluant vers la nécrose intestinale, la perforation et la péritonite.

Le rôle des radiographies abdominales dans le diagnostic de l'invagination intestinale est controversé. Bien qu'elles puissent apporter une valeur diagnostique dans certaines situations, leurs performances inférieures par rapport à l'échographie suggèrent qu'elles ne devraient pas être utilisées comme test de dépistage principal en cas de suspicion d'invagination. [63]

Dans ce cadre, un modèle d'intelligence artificielle basé sur l'apprentissage automatique a été élaboré pour l'analyse des radiographies abdominales en vue du diagnostic de l'invagination intestinale.

Lors d'une évaluation comparative des performances diagnostiques, l'algorithme a montré une sensibilité supérieure à celle des radiologues (76 % contre 46 %), tandis que la spécificité restait similaire entre les deux (96 % contre 92 %). [64]

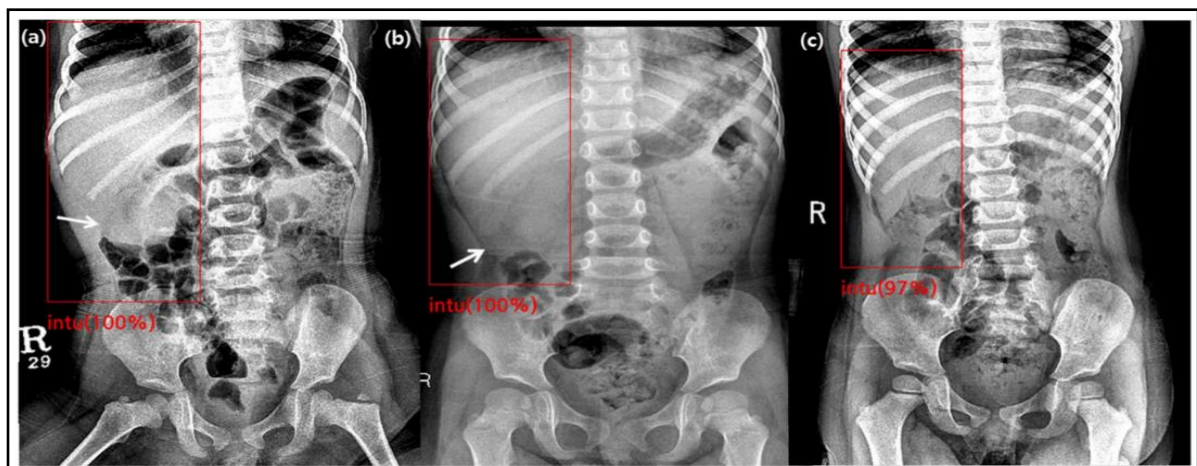


Figure 21. (a), (b) et (c) : Radiographies abdominales de trois filles montrant une invagination iléocolique détectée par l'algorithme (Intu =intussusception=invagination). [64]

❖ L'Echographie :

L'échographie est une technique d'imagerie en pleine expansion à l'échelle mondiale, favorisée par les avancées technologiques et les systèmes de santé numériques. Actuellement, les chirurgiens doivent manuellement recueillir et évaluer les images, ce qui limite la performance diagnostique en raison de la dépendance à l'opérateur.

En revanche, l'intelligence artificielle, notamment à travers l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond, peut reconnaître automatiquement des modèles complexes et fournir une évaluation quantitative des données d'imagerie, améliorant ainsi la précision et la reproductibilité des résultats. [65]

Des technologies d'intelligence artificielle, avec leur applications croissantes en échographie, permettent d'explorer diverses régions anatomiques, détecter et préciser la localisation des lésions, afin d'avoir un diagnostic.

▪ Les lésions focales hépatiques (LFH) :

Les lésions focales hépatiques (LFH) représentent un défi diagnostique majeur en imagerie, en particulier à partir d'images échographiques.

Face à cette problématique, une solution innovante a été développée sous la forme d'un algorithme reposant sur l'architecture des réseaux de neurones convolutifs (CNN). En s'appuyant sur un ensemble de données exceptionnellement vaste, composé de 40 397 images issues de 3 487 patients, dont 20 432 présentaient des LFH.

Ces images incluaient diverses pathologies telles que le carcinome hépatocellulaire, les kystes, les hémangiomes, ainsi que des zones de préservation ou d'infiltration graisseuse. Grâce à cette approche, l'algorithme démontre une capacité avancée à distinguer et diagnostiquer ces anomalies complexes. L'algorithme d'IA a réussi à identifier et diagnostiquer les cinq lésions avec une sensibilité de 83,9%, une spécificité de 97,1%, une précision de 95,4%. [66]

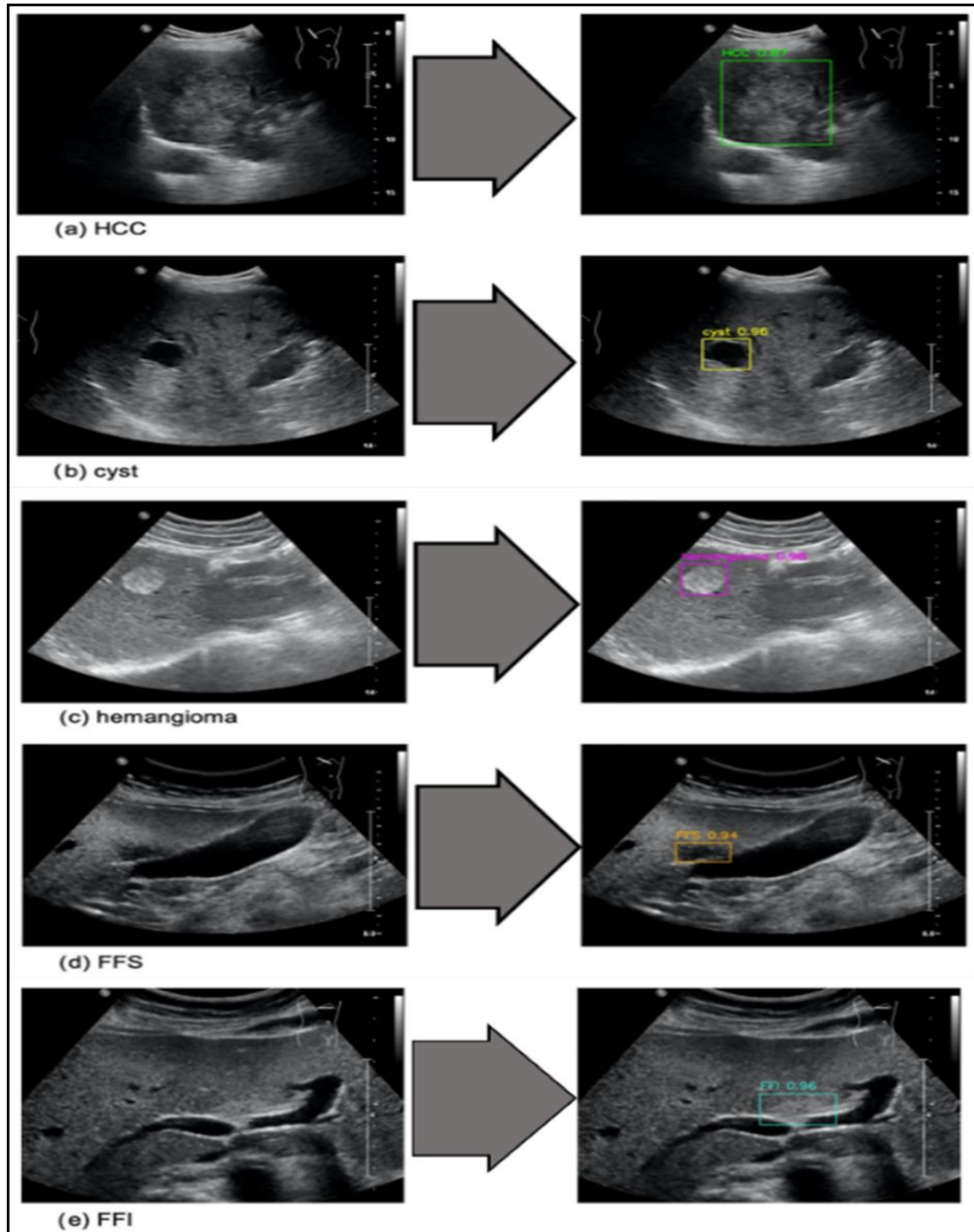


Figure 22. Exemples d'images représentant un carcinome hépatocellulaire (CHC) (a), un kyste (b), un hémangiome (c), une zone de préservation graisseuse focale (FFS) (d) et une infiltration graisseuse focale (FFI) (e). Les panneaux de gauche montrent les images originales analysées par le système d'intelligence artificielle (IA), tandis que ceux de droite présentent les encadrés délimitant chaque lésion, accompagnés des diagnostics prédits et de leur degré de confiance associé. [66]

- **L'Appendicite :**

Un modèle d'apprentissage automatique a été développé à partir d'un ensemble de données comprenant 579 enfants et 1709 images échographiques. Ce modèle vise à prédire le diagnostic, la prise en charge et la gravité des cas suspects d'appendicite en combinant l'analyse d'images échographiques avec des données médicales.

Les résultats ont montré une sensibilité de 80 % et une spécificité de 92 % pour le diagnostic des appendicites, démontrant ainsi l'efficacité de cette approche dans l'optimisation de la précision et de l'efficacité du processus diagnostique. [67]

L'échographie, enrichie par les technologies d'intelligence artificielle, constitue une innovation significative dans le domaine du diagnostic médical, permettant des résultats plus rapides et d'une précision accrue. Grâce à des algorithmes sophistiqués, l'IA analyse de manière automatisée les images échographiques, facilitant la détection et la caractérisation d'anomalies telles que les lésions hépatiques, les kystes, les hémangiomes ou les cas suspects d'appendicite.

En complétant l'expertise clinique par une évaluation quantitative et objective, ces systèmes minimisent les erreurs humaines, comme les diagnostics erronés, tout en améliorant la reproductibilité des résultats. Par ailleurs, l'IA fournit des prédictions accompagnées d'un indice de confiance, aidant les praticiens à prendre des décisions plus éclairées et adaptées à chaque patient.

Ainsi, l'intégration de l'IA en échographie améliore non seulement la fiabilité des diagnostics, mais optimise également la prise en charge, en réduisant les délais d'analyse et en renforçant l'efficacité des procédures.

❖ **La Tomodensitométrie (TDM) :**

La tomodensitométrie (TDM), communément appelée scanner, est un examen d'imagerie médicale essentiel en chirurgie viscérale. Elle permet une visualisation détaillée et précise des structures anatomiques abdominales, facilitant ainsi le diagnostic des pathologies, la planification des interventions chirurgicales et le suivi postopératoire.

Grâce à ses images en coupes transversales, le scanner offre une analyse approfondie des organes et des tissus, tout en aidant à identifier les anomalies et à anticiper les complications potentielles.

▪ **Cancer du Pancréas :**

Le cancer du pancréas figure parmi les tumeurs les plus mortelles et invasives du système digestif. [68]

Il présente le taux de survie à 5 ans le plus faible parmi tous les cancers, et son pronostic se détériore considérablement lorsque la tumeur dépasse 2 cm. Ainsi, la détection précoce reste la stratégie la plus efficace pour améliorer les chances de survie des patients.

Actuellement, la tomodensitométrie (TDM) est la modalité d'imagerie de référence pour le diagnostic du cancer du pancréas. Cependant, sa sensibilité reste limitée pour les tumeurs de petite taille, avec environ 40 % des tumeurs de moins de 2 cm qui échappent à la détection.

Pour pallier cette limitation, un outil de détection assistée par ordinateur basé sur l'apprentissage profond a été élaboré afin d'identifier les tumeurs pancréatiques à partir d'images de TDM abdominales. Ce modèle a démontré des performances prometteuses, atteignant une sensibilité de 87,5 % pour les tumeurs pancréatiques de moins de 2 cm, offrant ainsi une amélioration significative par rapport aux méthodes traditionnelles. [69]

Cette avancée technologique représente un espoir pour une détection plus précoce et une prise en charge optimisée des patients atteints de cancer du pancréas.

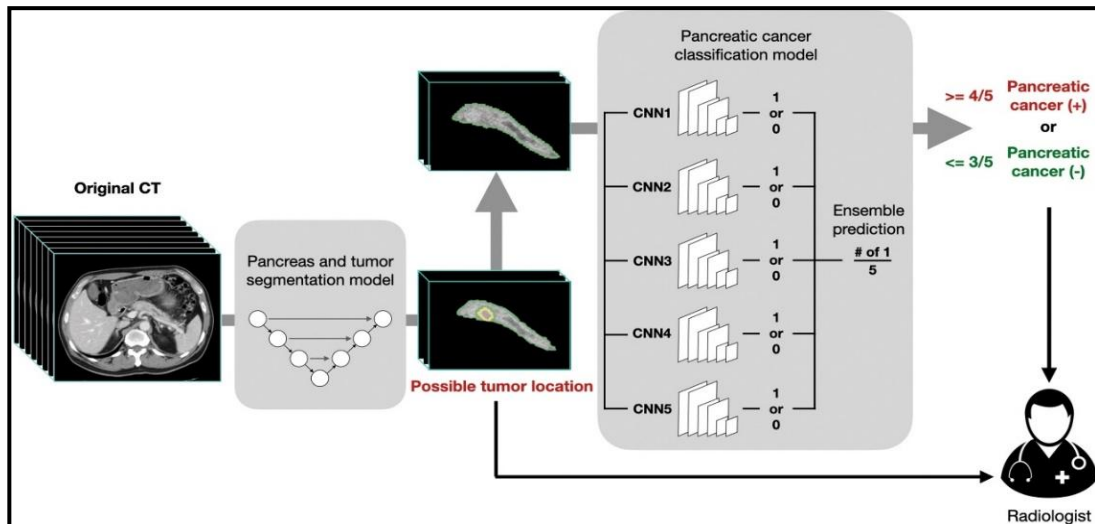


Figure 23. Flux de travail de l'outil de détection assistée par ordinateur avec le processus de segmentation, de classification et les résultats définitifs, [69]

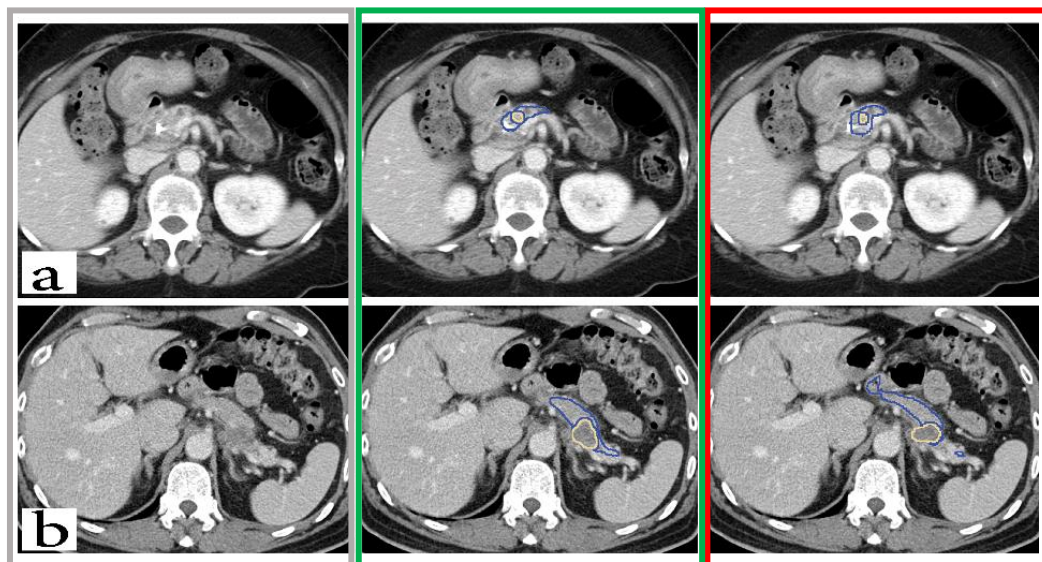


Figure 24. Des TDM représentatifs (colonne grise) montrent une tumeur au niveau du corps (a) et du queue (b) du pancréas, illustrant la correspondance de la localisation de la tumeur entre la segmentation manuelle effectuée par des radiologues (colonne verte) et les prédictions du modèle de segmentation (colonne rouge). Le contour bleu indique le pancréas, tandis que le contour jaune représente la tumeur. [69]

▪ **Traumatismes hépatiques :**

Les lésions hépatiques sont fréquentes en raison de la localisation antérieure du foie, de sa grande taille et de la fragilité de son parenchyme. Une détection précoce associée à une évaluation précise de la sévérité des traumatismes hépatiques et à un traitement approprié peut significativement réduire les taux de morbidité et de mortalité.

Grâce aux techniques d'apprentissage profond et de traitement des images, un algorithme a été développé pour segmenter avec précision le foie et les zones touchées par le traumatisme, offrant une estimation précise du pourcentage de parenchyme hépatique affecté. [70]

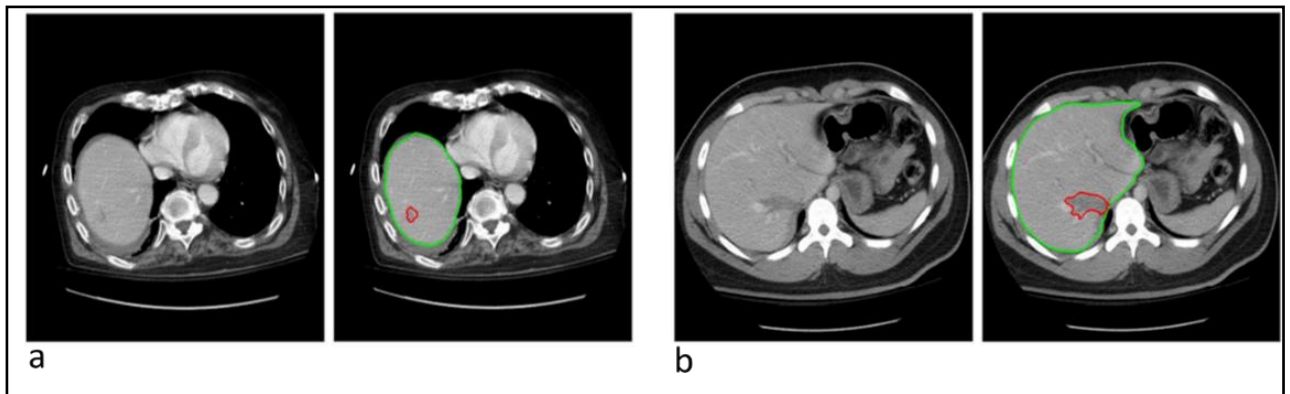


Figure 25. (a) et (b) : Des images de TDM abdominale originale (à gauche) et résultats de segmentation automatisée (à droite). La ligne verte représente le contour du foie, et la ligne rouge marque le contour des régions traumatiques. [70]

La précision de système pour la segmentation est de 96,35 % pour le parenchyme hépatique et de 56,76 % pour les zones de traumatisme hépatique. [70]

Un tel système peut aider en soins critiques en fournissant une évaluation quantitative reproductible des traumatismes hépatiques, offrant ainsi une alternative au système de classification actuellement utilisé.

- **Hémorragies digestives :**

En chirurgie viscérale les hémorragies digestives constituent une urgence médico-chirurgicale fréquente mais grave. La symptomatologie dépend de la cause et la localisation anatomique. Nécessitant une détection précoce et une intervention adaptée. En raison de sa rapidité et de sa disponibilité étendue, la TDM joue un rôle crucial dans le diagnostic.

En République de Corée un autre modèle d'IA basé sur des techniques d'apprentissage profond a été conçu en utilisant une base de données sous formes d'images radiologiques de TDM abdominale provenant de plusieurs hôpitaux pour but de détecter en temps réel les lésions d'hémorragie abdominale. Les résultats ont montré des performances remarquables, avec une sensibilité de 93,22 % et une spécificité de 99,60 %, démontrant ainsi son potentiel pour améliorer la précision et la rapidité du diagnostic des hémorragies digestives. [71]

- **Pneumopéritoine :**

Dans ce contexte, une étude a évalué les performances d'un algorithme d'intelligence artificielle pour la détection du pneumopéritoine chez des patients présentant des douleurs abdominales aiguës et ayant bénéficié d'une tomodensitométrie (TDM) abdominale. L'algorithme a démontré une spécificité élevée de 99 %, mais une sensibilité initiale modérée de 52 %.

Cependant, après exclusion des volumes d'air minimes (<0,25 mL), la sensibilité s'est améliorée à 81 %. Ces résultats indiquent que l'IA constitue un outil fiable pour confirmer la présence de pneumopéritoine, notamment dans les cas cliniquement significatifs, bien que sa capacité à détecter de faibles quantités d'air reste limitée. [72]

La tomodensitométrie (TDM) demeure un examen incontournable en chirurgie viscérale pour le diagnostic et le suivi des pathologies abdominales. L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'analyse des images TDM a permis d'améliorer la détection de diverses entités cliniques, telles que les tumeurs pancréatiques, les traumatismes hépatiques, les hémorragies digestives et les pneumopéritonies.

❖ **L'Imagerie Par Résonance Magnétique (IRM) :**

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un outil clé en chirurgie viscérale, offrant une résolution exceptionnelle des tissus mous et une analyse morphologique précise. Indispensable pour la caractérisation des lésions tumorales, inflammatoires ou traumatiques, elle complète la TDM en guidant la stadification tumorale, l'évaluation hépatobiliaire et la planification chirurgicale.

▪ **Carcinome hépatocellulaire (CHC) :**

Le carcinome hépatocellulaire (CHC), l'une des tumeurs malignes les plus fréquentes, constitue une cause majeure de mortalité liée au cancer à l'échelle mondiale.

Face à ce défi clinique, un modèle entièrement automatisé, reposant sur des techniques d'apprentissage profond, a été développé pour détecter le CHC à partir d'images par résonance magnétique (IRM). Ce modèle, basé sur un réseau de neurones convolutifs (CNN), a été entraîné sur un ensemble de données incluant 549 patients ayant bénéficié d'une résection chirurgicale.

Les performances du modèle, évaluées sur un ensemble externe de 54 patients, se sont révélées prometteuses, avec une sensibilité de 87 % et une spécificité de 93 %. Ces résultats soulignent le potentiel de l'intelligence artificielle pour améliorer la détection précoce et la prise en charge du CHC, tout en ouvrant des perspectives pour son intégration dans la pratique clinique quotidienne. [73]

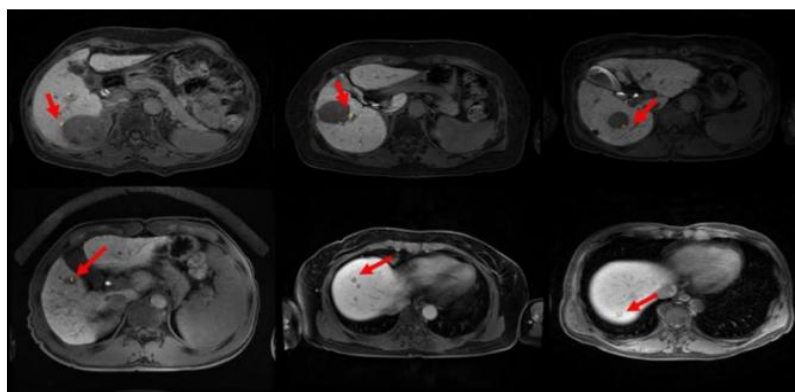


Figure 26. Résultats de détection du carcinome hépatocellulaire au niveau des images IRM par le modèle intelligent. [73]

▪ **Cancer rectal :**

Pour le diagnostic et la stadification du cancer rectal, un algorithme novateur, reposant sur des techniques d'apprentissage profond, a été mis au point. Cet outil permet une segmentation fine et précise des structures anatomiques clés, incluant la tumeur, le rectum et le mésorectum, offrant ainsi un support décisionnel précieux pour les chirurgiens.

En parallèle, il quantifie les surfaces respectives de ces structures, fournissant des données morphométriques essentielles à la planification thérapeutique. Les performances de l'algorithme, validées sur une cohorte clinique, ont démontré une sensibilité de 77,3 % pour la détection des stades T2/T3, une spécificité de 76,8 % et une précision globale de 77,1 %.

Ces résultats mettent en lumière son potentiel pour renforcer la précision diagnostique, optimiser la stadification tumorale et améliorer la prise en charge personnalisée des patients atteints de cancer rectal. [74]

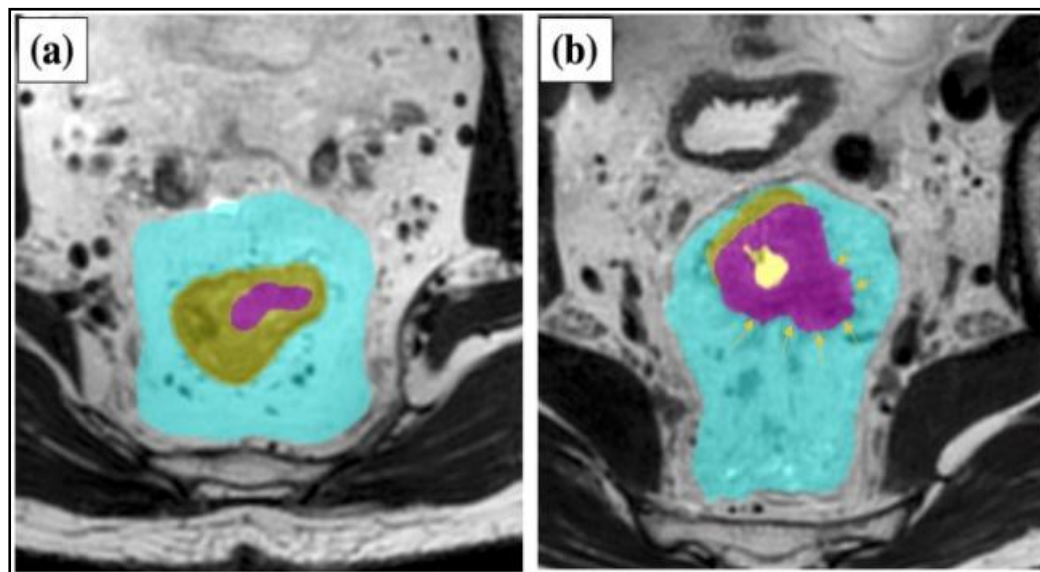


Figure 27. Algorithme de stadification. (a) un cas T2, et (b) un cas T3. Les zones magenta, jaune et cyan représentent respectivement la tumeur, le rectum et le mésorectum. [74]

L'intelligence artificielle améliore la détection et la stadification des cancers, comme le carcinome hépatocellulaire et le cancer rectal, grâce à une analyse précise des images IRM.

❖ L'Endoscopie :

L'endoscopie constitue un outil de diagnostic essentiel pour la détection précoce des anomalies gastriques, permettant une prise en charge rapide des pathologies chroniques et contribuant ainsi à réduire la mortalité et les coûts associés aux traitements. Par exemple, les cancers gastro-intestinaux, lorsqu'ils sont identifiés à un stade précoce, présentent un pronostic significativement amélioré avec des possibilités de guérison accrues.

Cependant, cette procédure reste complexe et exigeante. Sa durée varie entre 45 minutes et 8 heures, selon la zone explorée et l'expertise du praticien, et génère un volume considérable de données, pouvant inclure plus de 10 000 images par examen.

La majorité de ces images sont redondantes, et seule une fraction révèle des anomalies cliniquement pertinentes. Cette situation rend l'analyse fastidieuse, chronophage et susceptible d'engendrer des erreurs de diagnostic, notamment le risque de passer à côté de lésions significatives.

Face à ces défis, les systèmes d'aide au diagnostic assisté par ordinateur (SAD) émergent comme une solution innovante. Ces outils, basés sur des algorithmes d'intelligence artificielle, analysent automatiquement les images endoscopiques pour détecter des anomalies telles que des ulcères, des saignements, des polypes ou des signes précoces de cancer. [75]

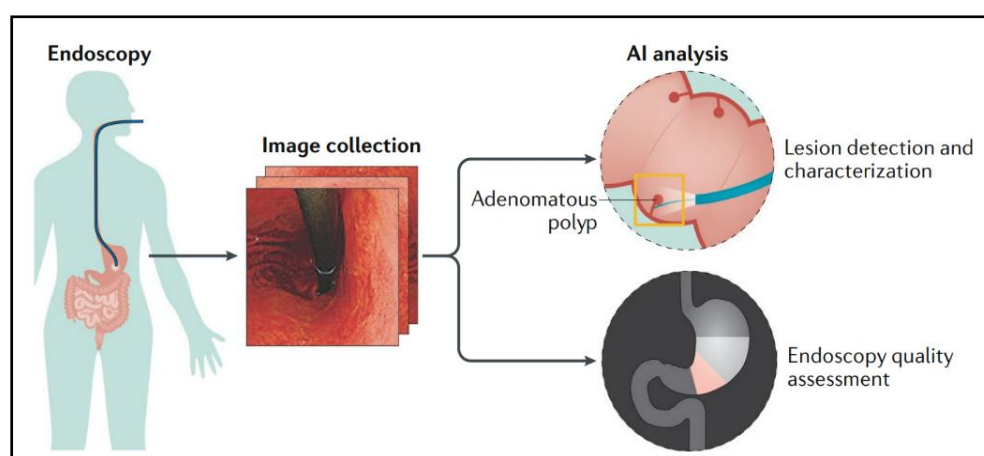


Figure 28. Utilisation d'intelligence artificielle en endoscopie pour la détection des anomalies et l'amélioration de la qualité des images endoscopiques. [76]

Le processus comprend plusieurs étapes, de l'acquisition et du prétraitement des images (extraction des caractéristiques, segmentation, etc.) à l'identification des anomalies (exemple : néoplasiques ou pas).

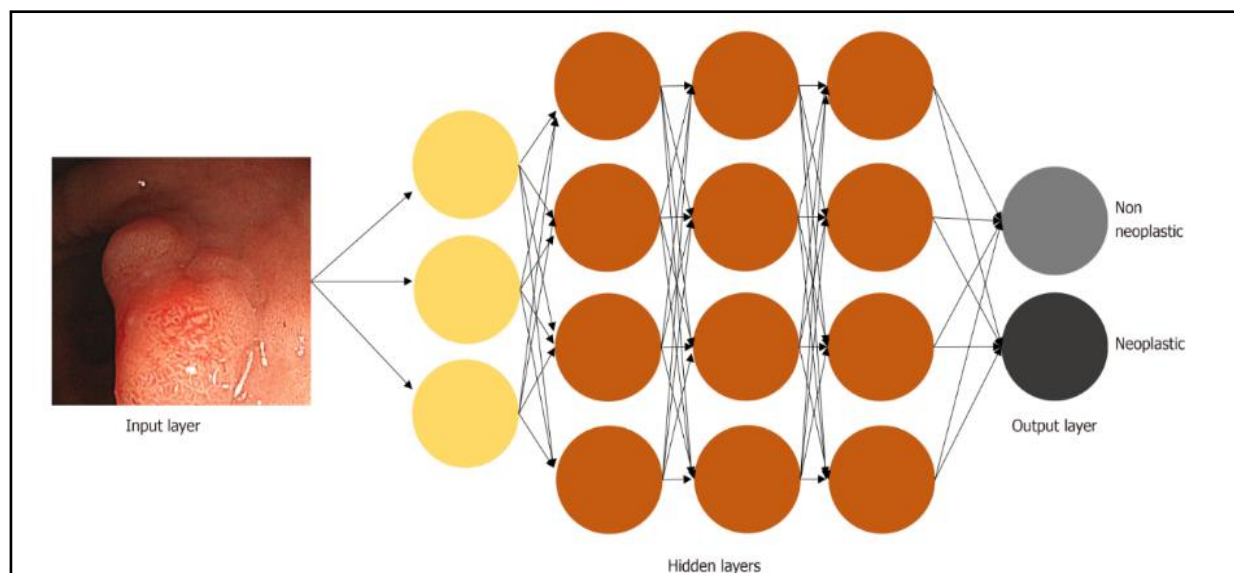


Figure 29. Modèle illustratif de processus d'analyse des images endoscopique. [77]

En automatisant l'analyse et en identifiant les images critiques, les SAD améliorent l'efficacité diagnostique, réduisent la charge de travail des cliniciens et minimisent le risque d'erreurs, tout en optimisant la prise en charge des patients. [75]

Des études récentes ont démontré l'efficacité des logiciels d'endoscopie basés sur l'intelligence artificielle dans le diagnostic de plusieurs pathologies gastro-intestinales.

Ces études ont montré que l'IA pouvait être utilisée pour diagnostiquer des affections telles que le cancer de l'œsophage, de l'estomac, ainsi que les polypes colorectaux.

▪ **Cancer de l'œsophage :**

L'œsophage de Barrett est un facteur de risque pour le développement de l'adénocarcinome œsophagien, Actuellement, le diagnostic optique de la dysplasie précoce liée à l'œsophage de Barrett (OB) ne peut être réalisé avec précision que par des experts. De plus, en ce qui concerne la détection des cancers gastriques, 10 % des cancers gastro-intestinaux supérieurs sont manqués lors de l'endoscopie. [78]

Au niveau du Centre Médical Universitaire d'Amsterdam, un système d'aide à la détection des lésions néoplasiques a été développé en collaboration avec l'Université de Technologie d'Eindhoven et 15 hôpitaux internationaux. Après un pré-entraînement, le système a été formé et validé avec 1 713 images de lésions néoplasiques et 2 707 images d'œsophage de Barrett non dysplasiques, délimitées par 14 experts.

Avec trois tests de validation, les résultats ont montré une sensibilité de 100 % pour l'ensemble de test 2 et de 88 % pour l'ensemble de test 3, avec une spécificité variant entre 64 % et 66 % pour les trois ensembles de test. [79]

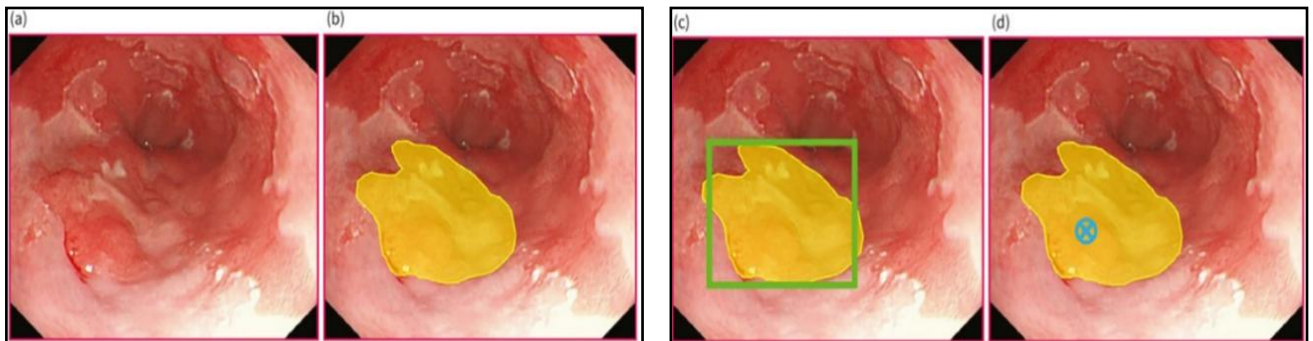


Figure 30. La différence de localisation entre le système d'aide à la détection et les endoscopistes : (a) image originale, (b) vérité de terrain basée sur les délimitations des experts, (c) encadré vert du système intelligent indiquant la localisation de la lésion néoplasique, (d) marque de biopsie de l'endoscopiste indiquant la localisation de la lésion néoplasique. [79]

Pour améliorer le diagnostic du carcinome épidermoïde œsophagien, qu'il soit à un stade précoce ou avancé, l'intégration d'outils innovants s'avère essentielle.

Dans ce contexte, un modèle d'intelligence artificielle a été élaboré pour l'analyse automatisée des images endoscopiques. Ce modèle, entraîné sur une base de données comprenant 2 309 images fixes et 104 vidéos en temps réel, a été conçu pour décoder les détails endoscopiques avec une précision exceptionnelle.

Les résultats obtenus démontrent l'efficacité remarquable du modèle. Pour les images en lumière blanche, il a atteint une précision de 99,5 %, une sensibilité de 100 % et une spécificité de 99,5 %. Pour les images améliorées, ces valeurs étaient respectivement de 97,0 %, 97,2 % et 96,4%. Par ailleurs, comparé aux performances humaines, il a montré une exactitude diagnostique équivalente à celle des experts (84,5 %), tout en surpassant significativement les praticiens novices. L'assistance de l'IA a également permis d'améliorer les performances des débutants, réduisant ainsi l'écart de compétence entre experts et novices.[80]

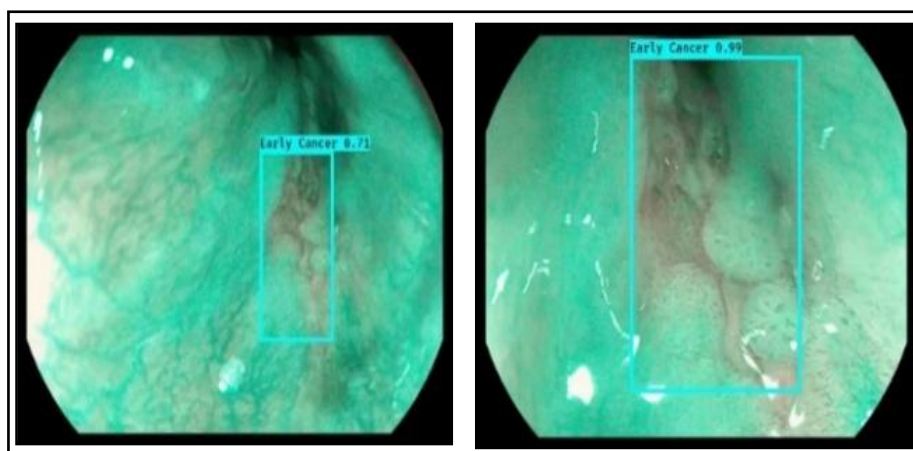


Figure 31. Images endoscopiques montrant la détection des lésions cancéreuses œsophagiennes (rectangle bleu) avec probabilité de présence,

(Images pris à partir des vidéos en temps réel). [80]

Ces résultats mettent en évidence le potentiel de l'IA pour optimiser la précision diagnostique du carcinome épidermoïde œsophagien, tout en offrant un outil précieux pour la formation et le soutien des praticiens moins expérimentés. Cette avancée technologique ouvre des perspectives prometteuses pour une prise en charge plus efficace et personnalisée des patients atteints de pathologies œsophagiennes.

- **Cancer gastrique :**

Le cancer gastrique représente la cinquième tumeur maligne la plus fréquente et la troisième cause de décès par cancer à l'échelle mondiale. Le pronostic des patients dépend fortement du stade au moment du diagnostic. Les patients dont le cancer gastrique est détecté à un stade précoce bénéficient d'un taux de survie à 5 ans dépassant 90 %.

En revanche, ceux diagnostiqués à un stade avancé présentent un pronostic nettement moins favorable, soulignant l'importance cruciale d'un diagnostic précoce pour améliorer les résultats cliniques. [81]

Grâce à un modèle de réseaux de neurones convolutifs, il est désormais possible de différencier efficacement le cancer gastrique intra-muqueux du cancer avancé, avec des résultats impressionnants : une sensibilité de 90,5 % et une spécificité de 85,3 %.

Ce système d'intelligence artificielle a permis aux endoscopistes novices d'atteindre des performances diagnostiques équivalentes à celles des praticiens expérimentés, avec une précision de 84,6 % contre 85,5 %. En parallèle, l'intégration de l'IA a optimisé le temps d'analyse, réduisant la durée du diagnostic de 4,35 à 3,01 secondes. [82]

Ce modèle se distingue comme un outil innovant, renforçant à la fois l'efficacité et la précision des procédures endoscopiques, tout en facilitant la standardisation des pratiques cliniques.

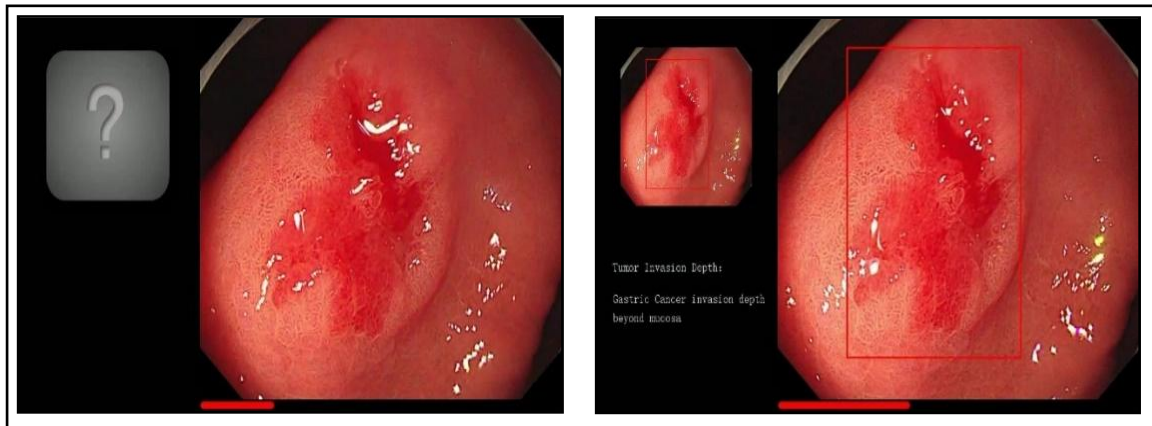


Figure 32. Images représentatives du cancer gastrique intra muqueux détecter par le model (CNN) (images prises d'une vidéo présentative). [82]

Un autre système d'intelligence artificielle, similaire dans son approche, a été développé et entraîné sur une base de données comprenant 13 584 images endoscopiques de cancer gastrique.

Ce système a démontré une capacité d'analyse rapide, traitant 2 296 images en seulement 47 secondes, tout en diagnostiquant les lésions gastriques avec une sensibilité de 92,2%. [83]

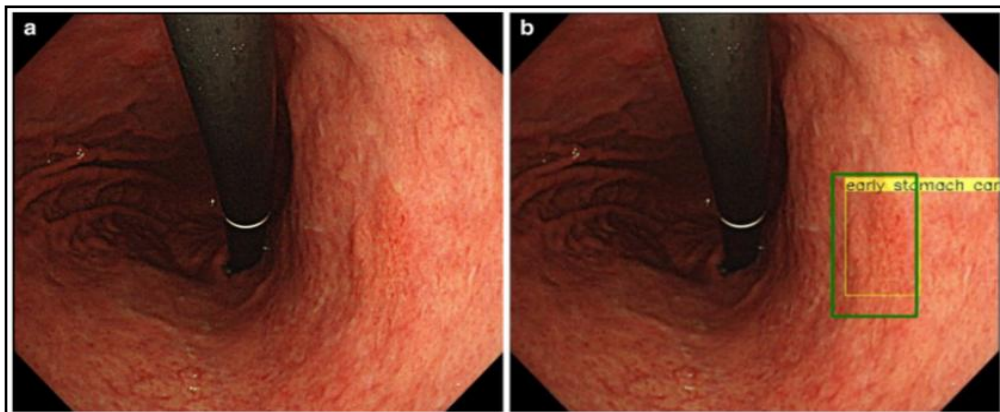


Figure 33. (a) Image endoscopique montrent un cancer gastrique et (b) lésion détecter par le système intelligent (rectangle jaune) et par un endoscopiste marqué manuellement (rectangle vert). [83]

▪ **Cancer colorectal :**

Le cancer colorectal (CCR) est le quatrième cancer le plus diagnostiqué et la troisième cause de décès par cancer dans le monde. Cependant, l'incidence et la mortalité du CCR ont diminué au cours de la dernière décennie grâce à une augmentation des dépistages.[84]

Un diagnostic optique précis des polypes colorectaux pourrait améliorer la rentabilité de la coloscopie et réduire les complications liées à la polypectomie. Cependant, il est difficile pour les non-experts d'atteindre des performances diagnostiques suffisantes.

Des systèmes basés sur l'intelligence artificielle ont été développés pour analyser les images endoscopiques, permettant d'identifier les néoplasmes avec une grande précision et une faible variation entre observateurs.[85]

✓ **EndoBRAIN :**

Le système EndoBRAIN a été initialement entraîné sur un ensemble de 69 142 images endocytoscopiques, provenant de patients atteints de polypes colorectaux ayant subi une endoscopie dans cinq centres académiques japonais entre octobre 2017 et mars 2018.

Une analyse comparative rétrospective a été menée pour évaluer les performances diagnostiques d'EndoBRAIN par rapport à celles de 30 endoscopistes, incluant 20 stagiaires et 10 experts. Le système a été testé pour sa capacité à distinguer les lésions néoplasiques des non-néoplasiques, en utilisant les résultats de l'analyse histopathologique comme référence standard.

EndoBRAIN a démontré des performances exceptionnelles, identifiant les lésions coliques avec une sensibilité de 96,9 %, une spécificité de 100 % et une précision de 98 %. Ces valeurs étaient significativement supérieures à celles des endoscopistes stagiaires et experts, soulignant la supériorité du système dans la détection et la classification des lésions colorectales.

Ces résultats mettent en évidence le potentiel d'EndoBRAIN pour améliorer la précision diagnostique en endoscopie, tout en réduisant la variabilité inter-observateur et en optimisant la prise en charge des patients atteints de pathologies colorectales. [85]

✓ CADeye :

Une intelligence artificielle dédiée à la détection et au diagnostic des polypes colorectaux, CADeye, a été évaluée dans une étude comparative impliquant cinq experts et cinq stagiaires. Le système a été testé sur un ensemble de 100 polypes provenant de 25 patients, avec des images fixes validées par examen histopathologique.

Cette approche a permis de comparer les performances de CADeye à celles des praticiens, mettant en lumière son potentiel pour améliorer la précision diagnostique en endoscopie.

Les taux de détection de CADeye étaient de 85,0 % et 67,0 % pour l'imagerie en lumière blanche, et de 89,0 % et 75,0 % pour l'imagerie en lumière colorée. L'exactitude diagnostique du système s'élevait à 88,8 % pour les images non amplifiées et à 87,8 % pour les images amplifiées.

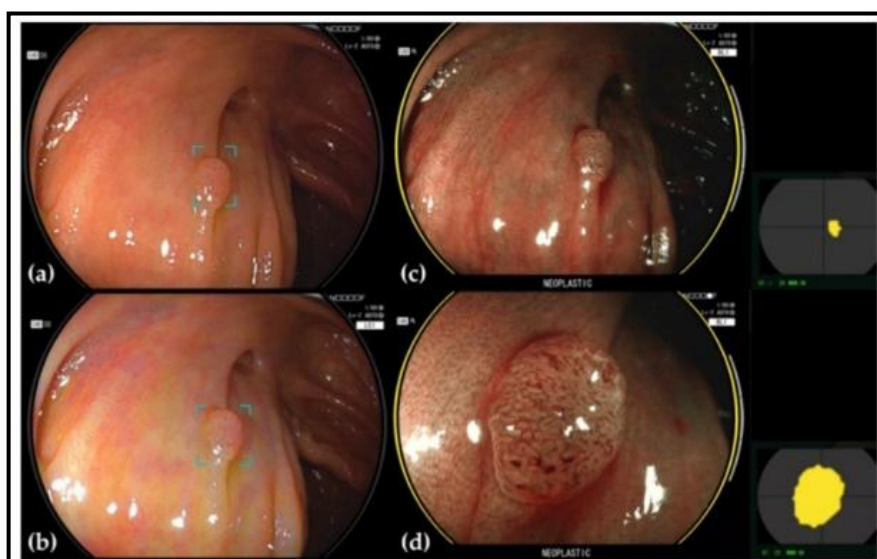


Figure 34. Le système CADEYE : illustre la détection et le diagnostic d'un adénome avec (a) : Les contours de la zone autour d'un polype suspect sont délimités sous imagerie à lumière blanche. (b) : La même zone est délimitée sous imagerie couleur liée. (c) : Si la lésion est classée comme néoplasique sous imagerie, l'image endoscopique est entourée de jaune et le mot « NÉOPLASIQUE » apparaît en dessous. L'emplacement de l'évaluation est également indiqué à droite de l'image endoscopique. (d) : Image amplifiée de la lésion. [86]

L'exactitude de CADeye s'est révélée comparable à celle des experts (92,0%), tout en surpassant significativement celle des stagiaires (79,0 %).

Ces résultats soulignent le potentiel de cette technologie pour améliorer la détection et la classification des polypes colorectaux, offrant ainsi un outil précieux pour optimiser les pratiques endoscopiques et réduire la variabilité inter-observateur. [87]

En conclusion, l'intégration de l'intelligence artificielle en endoscopie digestive a marqué une avancée significative dans la détection des cancers de l'œsophage, de l'estomac et colorectal.

Des systèmes tels qu'EndoBRAIN et CADeye ont montré une précision diagnostique remarquable dans l'identification des lésions néoplasiques, surpassant les performances des endoscopistes novices et rivalisant avec celles des experts.

Ces technologies améliorent non seulement la précision diagnostique, mais aussi la rapidité d'analyse, réduisant ainsi le temps nécessaire pour détecter les anomalies.

En chirurgie viscérale, l'IA joue aussi un rôle central dans l'interprétation des images radiologiques issues de l'abdomen sans préparation (ASP), de la tomodensitométrie (TDM), de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et de l'endoscopie abdominale.

Grâce à des algorithmes d'apprentissage profond, notamment les réseaux neuronaux convolutifs (CNN), elle permet une identification rapide et précise des anomalies, telles que les tumeurs ou les lésions inflammatoires, avec une sensibilité et une spécificité accrues.

En outre, l'IA facilite la planification thérapeutique en fournissant des informations détaillées sur la nature, la localisation et l'étendue des lésions. Cette approche optimise la prise de décision clinique et la gestion des patients, contribuant à des résultats opératoires plus favorables et à une amélioration globale des soins en chirurgie viscérale.

❖ L'Histologie / Anatomie-Pathologie :

Les pathologistes jouent un rôle central dans le diagnostic oncologique, procédant à l'examen microscopique des tissus et liquides biologiques pour établir un diagnostic histopathologique précis et orienter les stratégies thérapeutiques. Néanmoins, cette approche manuelle est chronophage et sujette à une variabilité inter-observateur, compromettant la reproductibilité des résultats.

L'augmentation de l'incidence des cancers a engendré une hausse significative du volume de biopsies à analyser, entraînant une surcharge des services de pathologie et des délais diagnostiques, pouvant impacter la précision et la rapidité des prises en charge thérapeutiques. Bien que l'ajout de techniques complémentaires, telles que l'immunohistochimie et les analyses moléculaires, améliore la précision diagnostique, ces méthodes restent limitées par la disponibilité des ressources spécialisées.

Dans ce cadre, l'histopathologie numérique s'est imposée comme une solution innovante, révolutionnant les pratiques diagnostiques. En permettant la numérisation, l'archivage et l'analyse quantitative des lames histologiques, cette technologie réduit la charge de travail tout en améliorant la productivité et la fiabilité des diagnostics.

L'intégration de l'intelligence artificielle à ces plateformes numériques offre des fonctionnalités avancées, automatisant l'identification des zones d'intérêt, l'extraction de caractéristiques morphométriques et la classification des images histologiques selon des catégories diagnostiques prédéfinies.

Cette convergence entre l'histopathologie numérique et l'IA ouvre des perspectives prometteuses pour optimiser le workflow diagnostique, accélérer les délais d'analyse et renforcer la précision des décisions thérapeutiques, tout en améliorant la qualité des soins dispensés aux patients. [88]

▪ **Cancer gastrique :**

L'évaluation histopathologique des échantillons gastriques est cruciale pour la gestion clinique, nécessitant des pathologistes expérimentés et un processus qui prend du temps. [89]

Le diagnostic pathologique des prélèvements biopsiques et des pièces de résection du cancer gastrique (CG) repose principalement sur l'histo-morphologie des lames colorées à l'hématoxyline-éosine (H&E).

Les algorithmes d'apprentissage profond récemment développés permettent une détection précise des types de cellules cancéreuses et non cancéreuses, ainsi que des zones tumorales et du stroma dans divers types de cancers. [90]

Issu de l'analyse de 2 434 images de lames entières, un algorithme innovant basé sur des réseaux de neurones convolutifs (CNN) a été conçu pour classer avec précision les biopsies gastriques en trois catégories distinctes, allant de l'absence de dysplasie (NFD) à l'adénome tubulaire (TA), jusqu'au carcinome (CA). [91]

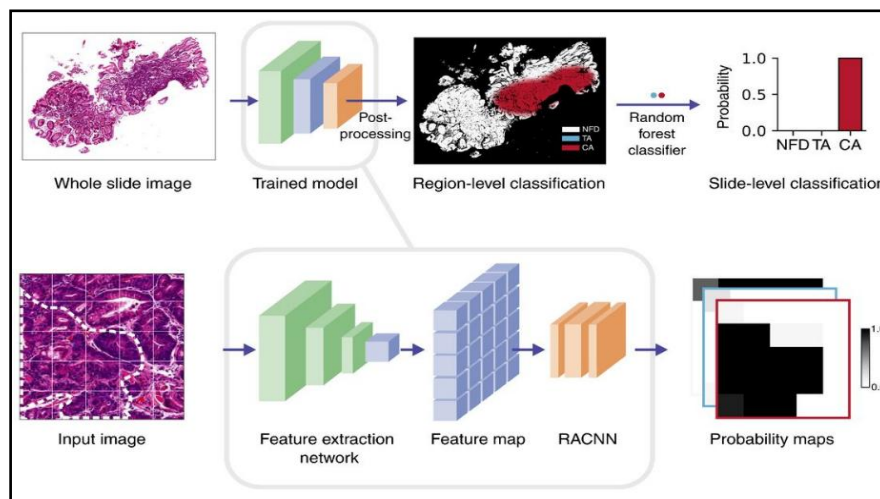


Figure 35. Les étapes d'analyse et d'extraction des données par l'algorithme utiliser. [91]

La performance de l'algorithme a été évaluée sur 7 440 échantillons de biopsie recueillis prospectivement et l'impact du diagnostic assisté par l'algorithme a été évalué par six pathologistes utilisant 150 cas de biopsies gastriques.

La sensibilité et la spécificité pour le diagnostic étaient respectivement de 100 % et 97,49 % pour l'analyse des tumeurs épithéliales et le temps moyen de révision par lame était significativement réduit dans le groupe utilisant l'outil de visualisation d'images numériques assisté par le model = 18,90 secondes par rapport au visualiseur numérique seul = 35,70 secondes et au microscope conventionnel = 44,97 secondes. [91]

Tableau 1: Temps moyen de révision par lame selon la méthode utilisée

Méthode :	Temps moyen de révision par lame :
Outil de visualisation assisté par IA	18,90 secondes
Visualiseur numérique seul	35,70 secondes
Microscope conventionnel	44,97 secondes

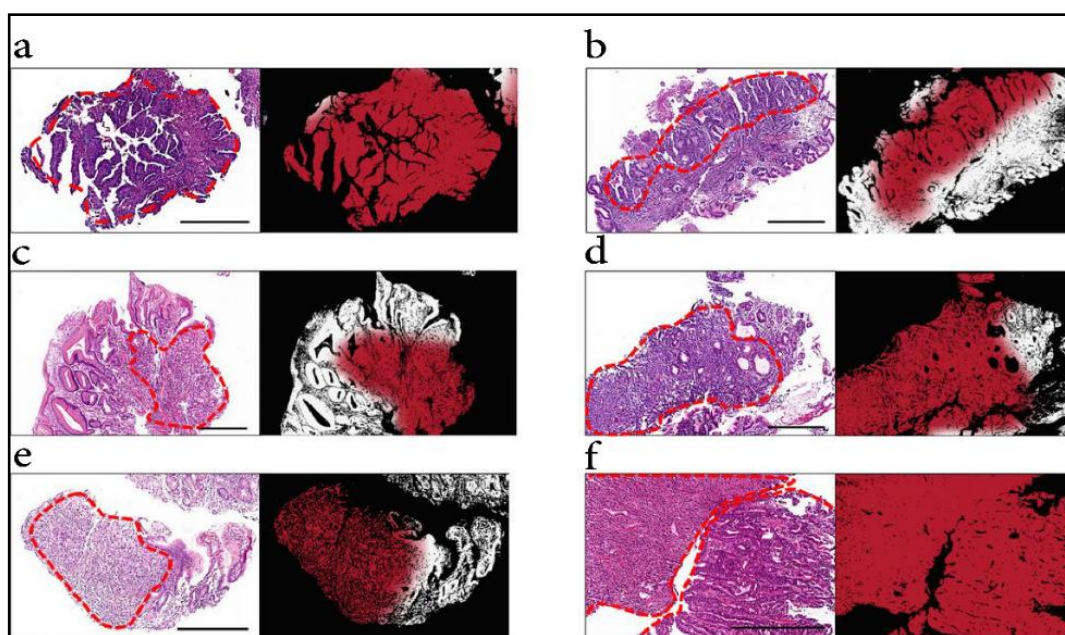


Figure 36. Images de l'adénocarcinome papillaire (a), des adénocarcinomes tubulaires bien différenciée (b), modérée (c) et médiocre (d), carcinome à cellules en anneau (e) et carcinome mixte (f) ,(Les zones identifiées par les pathologistes et marquées par des lignes pointillées rouges correspondent bien aux zones rouges reconnues par l'algorithme). [91]

À l'Hôpital Général de l'Armée Populaire de Libération de Chine, un système intelligent similaire a été mis au point en utilisant un réseau de neurones convolutifs. Ce système a été formé à l'aide de 2 123 images de lames entières colorées à l'hématoxyline-éosine (H&E), avec des annotations au niveau des pixels.

Le modèle affiche une sensibilité proche de 100 % et une spécificité moyenne de 80,6 %. Ce système a démontré sa capacité à aider les pathologistes à accroître la précision des détections et à réduire les erreurs de diagnostic de cancer gastrique. De plus, il a montré une performance robuste soulignant ainsi la faisabilité et les bénéfices de l'intégration de systèmes d'assistance par intelligence artificielle en histopathologie dans des contextes de pratique courante. [92]

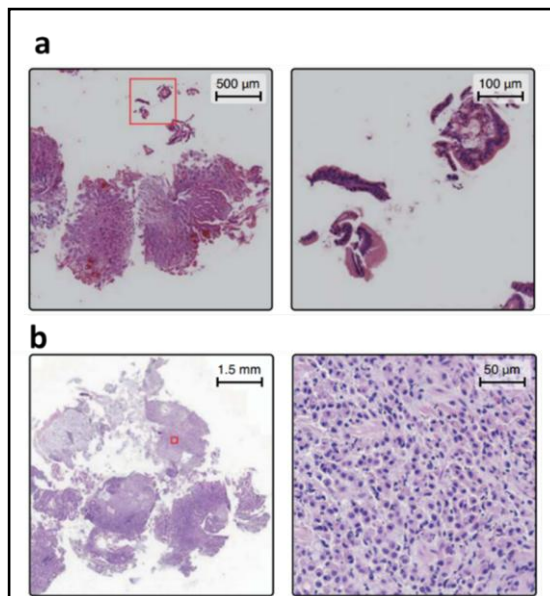


Figure 37. (a) et (b) : Deux cas détectés par le système d'assistance IA qui avaient été initialement mal diagnostiqués par les pathologistes. [92]

Ces systèmes ont permis d'améliorer significativement la précision et l'efficacité du diagnostic du cancer gastrique, en soutenant les pathologistes dans l'analyse des biopsies.

Ces technologies minimisent les erreurs humaines, optimisent le temps de révision et favorisent une identification précoce des lésions précancéreuses, contribuant ainsi à une prise en charge plus rapide et plus fiable des patients.

- **Carcinome hépatocellulaire (CHC) :**

Le diagnostic du carcinome hépatocellulaire (CHC), repose couramment sur utilisation des méthodes non invasives comme la tomodensitométrie et l'IRM. Malgré cela, l'analyse histopathologique reste essentielle dans le cadre de la prise en charge, car elle permet d'obtenir un diagnostic précis et fournit des informations cruciales pour le pronostic. [93]

Le carcinome hépatocellulaire (CHC) et le cholangiocarcinome (CC) représentent respectivement 70 % et 15 % des cancers du foie. Leur distinction est cruciale pour le pronostic et la gestion des patients, car des traitements comme la transplantation hépatique sont indiqués pour le CHC mais souvent contre-indiqués pour le CC. Différencier ces deux types reste difficile, même pour les pathologistes spécialisés.

Grâce à un outil basé sur l'apprentissage profond, les médecins peuvent désormais différencier avec précision deux sous-types majeurs de cancer primaire du foie : le carcinome hépatocellulaire et le cholangiocarcinome. Ce système intelligent, accessible via une interface cloud, offre aux professionnels de la santé un "second avis virtuel" en temps réel.

En utilisant des images de lames entières colorées à l'hématoxyline-éosine, l'outil permet une analyse rapide et précise, facilitant ainsi la prise de décision et améliorant l'efficacité des diagnostics. [94]

L'impact de model sur la performance diagnostique de 11 pathologistes ayant des niveaux d'expertise variés a été évalué. Ce modèle a atteint une précision de 88% sur un ensemble de validation de 26 images de lames et de 84% sur un ensemble de test indépendant de 80 images.

L'utilisation de l'assistant n'ait pas modifié la précision moyenne des 11 pathologistes mais elle a significativement amélioré la précision d'un sous-groupe de neuf pathologistes regroupés par niveaux d'expérience bien définis (spécialistes, non-spécialistes et stagiaires). Ainsi qu'en mode assisté, la précision du modèle a eu un impact notable sur les décisions diagnostiques de l'ensemble des 11 pathologistes. [94]

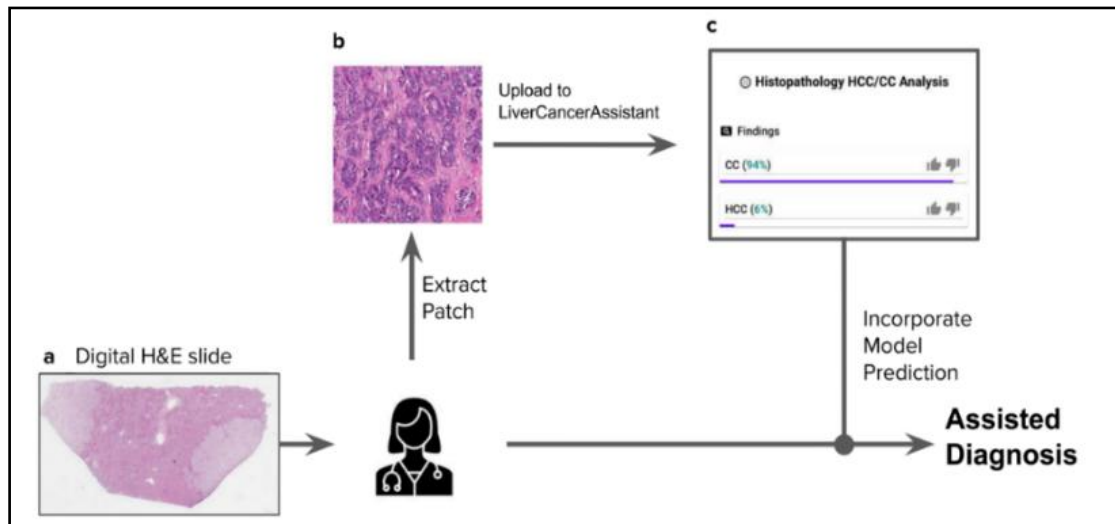


Figure 38. Le flux de travail diagnostique du pathologiste avec assistance : Après avoir examiné l'image de lame entière colorée à l'hématoxyline-éosine (H&E) (a), le pathologiste extrait un patch tumoral à un grossissement de $\times 10$ (b), le télécharge sur le modèle basé dans le cloud, qui génère des probabilités prédites pour le cholangiocarcinome (CC) et le carcinome hépatocellulaire (HCC) dans l'interface utilisateur (c). Ces résultats sont intégrés à l'impression diagnostique du pathologiste pour aboutir à un diagnostic final assisté. [94]

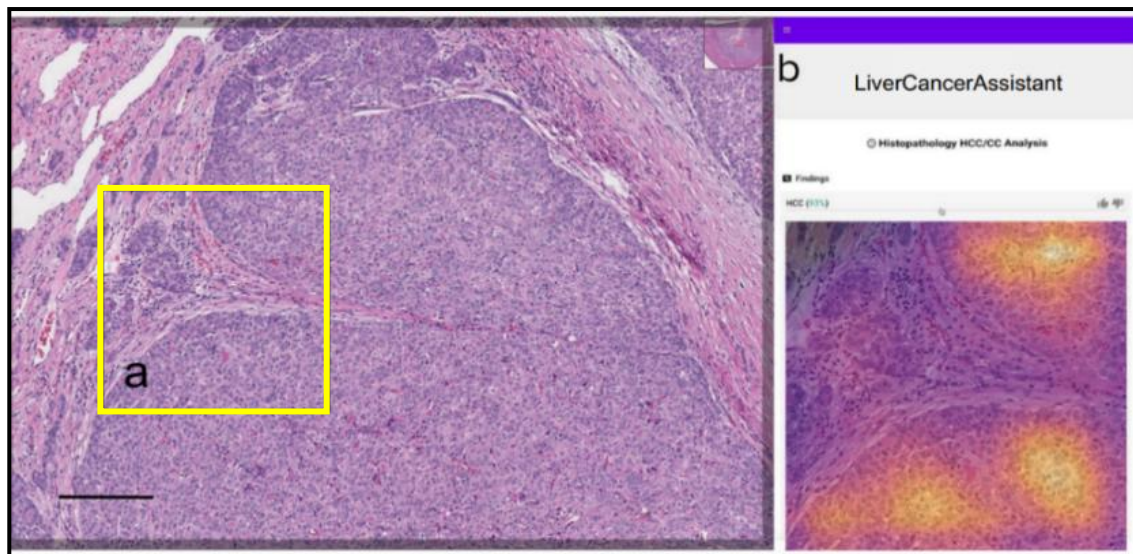


Figure 39. Les Interfaces graphiques du modèle : (a) une région d'intérêt tumorale détecté par les pathologistes (cadre jaune), (b) la probabilité pour chaque diagnostic (ici, CHC), accompagnée d'une carte d'activation de classe pour aider à l'interprétation. [94]

▪ **Cancer colorectal :**

Avec l'augmentation du nombre de coloscopies réalisées, les biopsies colorectales constituent une part importante de la charge de travail des laboratoires d'histopathologie. [95]

✓ **QAi COLON Dx :**

Un algorithme intelligent développé par **Qritive** et composé de deux modèles distincts. Le premier est un modèle de segmentation des glandes qui identifie les régions potentiellement à haut risque sur les images de lames entières. Le second est un modèle de classification des lames qui catégorise les images en tant que 'haut risque' ou 'bas risque'. [95]

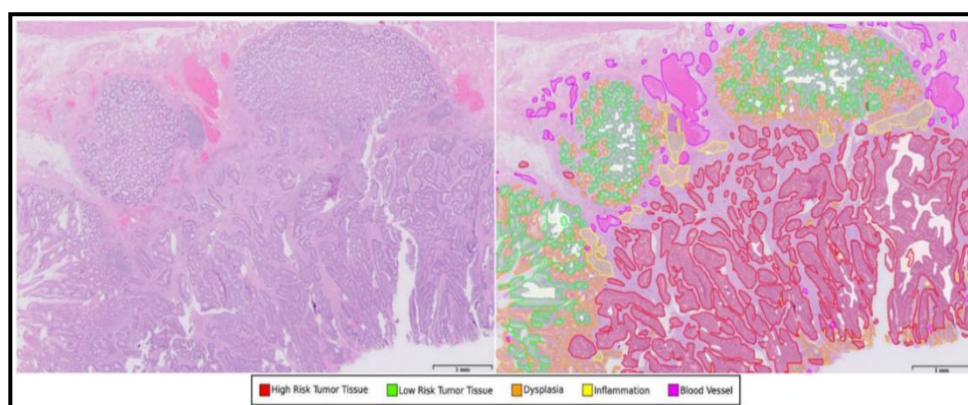


Figure 40. (a) image originale, (b) le modèle de segmentation : avec mise en évidence des régions de la lame entière : (vert) probablement bénignes ou normales, (orange) probablement dysplasiques et (rouge) probablement malignes avec segmentation des vaisseaux sanguins (rose) et l'inflammation (jaune), ces segmentations prises en compte pour le classement de la lame. [95]

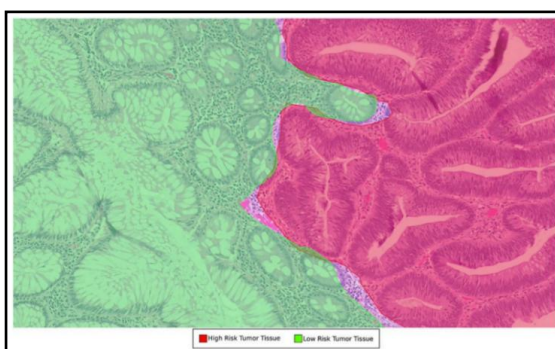


Figure 41. Étiquetage des régions par le modèle avec régions “à haut risque” (rouge) par rapport aux régions “à faible risque” (vert). [95]

L'utilisation de ces deux modèles distincts garantit la robustesse des résultats et offre au pathologiste en charge une meilleure interprétation et orientation. Le modèle d'IA a atteint une sensibilité de 97,4 % dans la détection des caractéristiques à haut risque de dysplasie et de malignité. Montrant son utilité dans les flux de travail. [95]

L'intégration de l'intelligence artificielle en pathologie joue un rôle crucial dans le diagnostic et la gestion des cancers. En automatisant l'analyse des images histologiques, l'IA permet une détection plus précise des lésions, une stadification tumorale améliorée et une caractérisation approfondie des caractéristiques histologiques. Ces avancées facilitent une prise de décision clinique plus éclairée et personnalisée, optimisant ainsi les stratégies thérapeutiques et améliorant les résultats pour les patients atteints de cancer.

❖ **Bilans Biologiques :**

La numération formule sanguine (NFS) est l'un des tests les plus fréquemment prescrits par les chirurgiens, car elle fournit des informations cruciales sur l'état du patient. Elle est utilisée à la fois comme un examen de dépistage et comme un outil essentiel pour le diagnostic et le suivi des maladies infectieuses, des urgences médico-chirurgicales et des interventions chirurgicales.[96]

L'intelligence artificielle joue un rôle de plus en plus crucial dans l'analyse des bilans biologiques. En utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, l'IA permet de détecter des anomalies subtiles dans les résultats de ces tests, d'identifier des tendances et de prévoir des complications potentielles. Cela améliore non seulement la précision du diagnostic, mais permet également une gestion plus rapide et personnalisée des prises en charge, notamment dans le cadre de la chirurgie viscérale.

En automatisant l'analyse des données biologiques, l'IA optimise les processus cliniques, réduit les risques d'erreur humaine et soutient les décisions chirurgicales en temps réel.

▪ Appendicite :

L'appendicite aiguë est l'une des urgences chirurgicales les plus fréquentes, en particulier chez les patients pédiatriques se présentant avec des douleurs abdominales.

Le diagnostic de l'appendicite aiguë, ainsi que l'orientation vers la chirurgie, reposent essentiellement sur la présentation clinique, les examens de laboratoire et l'imagerie radiologique. Toutefois, cette méthode peut entraîner un taux de faux positifs pour l'appendicectomie allant jusqu'à 10 à 15 %. [97]

Au sein du service de chirurgie viscérale de l'Hôpital universitaire de Split, un modèle d'apprentissage automatique a été développé dans le but d'optimiser la prise en charge diagnostique des patients pédiatriques présentant des symptômes évocateurs d'appendicite aiguë.

L'objectif principal de cette approche innovante repose sur la réduction du nombre d'appendicectomies inutiles, en améliorant la précision diagnostique et en limitant les interventions chirurgicales non justifiées.

Ce modèle d'intelligence artificielle s'appuie sur l'analyse approfondie de plusieurs paramètres cliniques et biologiques, incluant l'âge, le sexe, la durée des symptômes, la température corporelle, ainsi que des biomarqueurs inflammatoires tels que le taux de leucocytes, la protéine C-réactive (CRP), les pourcentages de neutrophiles et de lymphocytes. En complément, des ratios spécifiques ont été intégrés à l'algorithme, notamment le rapport thrombocytes/lymphocytes et neutrophiles/lymphocytes, afin d'affiner l'évaluation du risque d'appendicite compliquée.

L'analyse rétrospective et la validation clinique de ce modèle ont permis de démontrer une réduction significative, estimée à 17 %, du taux d'appendicectomies inutiles chez les patients présentant une forte probabilité clinique d'appendicite aiguë. Parallèlement, l'algorithme a fait preuve d'une précision remarquable dans l'identification des formes compliquées, nécessitant impérativement une prise en charge chirurgicale en urgence. [97]

▪ Carcinome Hépatocellulaire :

Un diagnostic rapide et précis du carcinome hépatocellulaire (CHC) est essentiel pour améliorer l'efficacité des traitements. Actuellement, le diagnostic repose sur l'analyse des niveaux d'alpha-fœtoprotéine (AFP) et des examens d'imagerie. Cependant, la sensibilité de l'AFP est d'environ 60 %, et ses niveaux peuvent également augmenter dans d'autres troubles, ce qui limite sa spécificité pour le CHC. [98]

Récemment, des algorithmes d'apprentissage automatique ont montré leur potentiel pour améliorer le diagnostic du carcinome hépatocellulaire (CHC).

Dans cette optique, un modèle a été créé en intégrant des voies biologiques personnalisées avec un algorithme d'apprentissage automatique, afin d'optimiser la détection de cette pathologie.

Pour valider l'efficacité de ce modèle, des examens cliniques et biologiques pertinents ont été réalisés. Les résultats ont révélé une performance impressionnante, permettant de distinguer avec précision le CHC des tissus hépatiques non cancéreux. Ainsi, ce modèle offre une assistance précieuse aux chirurgiens, facilitant le diagnostic et la prise en charge des patients atteints de CHC. [98]

Les modèles d'intelligence artificielle occupent une place essentielle en chirurgie viscérale, en particulier dans l'interprétation des bilans biologiques. Ces systèmes permettent d'identifier des anomalies biologiques et de prédire les risques de complications postopératoires, contribuant ainsi à optimiser la précision diagnostique et la prise en charge thérapeutique.

Dans le contexte de l'appendicite aiguë, l'IA participe à la réduction des appendicectomies non justifiées grâce à l'analyse approfondie des marqueurs biologiques. Concernant le carcinome hépatocellulaire (CHC), l'intégration de l'IA facilite un diagnostic plus fiable en croisant les données des voies biologiques avec des algorithmes d'apprentissage automatique, permettant une approche plus personnalisée et précise.

1.2. La Planification Pré opératoire :

La planification préopératoire en chirurgie viscérale repose sur une approche holistique, où les données diagnostiques sont méticuleusement analysées pour anticiper les risques potentiels.

En intégrant cette analyse avec des outils de simulation avancés et de visualisation en 3D, les équipes chirurgicales peuvent mieux comprendre les défis à venir et préparer des stratégies personnalisées.

L'estimation précise de la durée opératoire, facilitée par l'intelligence artificielle, complète cette démarche en optimisant non seulement les choix des interventions, mais aussi la gestion des ressources hospitalières, permettant ainsi une prise de décision éclairée et une intervention plus fluide et maîtrisée.

1.2.1. Stratification Du Risque Opératoire :

Le risque de complications provient des interactions entre l'état préopératoire du patient et sa capacité physiologique à supporter le stress lié à la chirurgie, modulé par le type et la qualité du geste opératoire ainsi que de l'anesthésie auxquels le patient est soumis.

Durant la période pré opératoire, la mesure précise du risque de complications repose principalement sur l'utilisation d'outils de prédiction validés et sur l'expérience clinique du chirurgien.

Cependant, une évaluation individualisée des risques, tenant compte des spécificités de chaque patient, demeure une tâche complexe et difficile à prédire avec exactitude. Cette limitation est liée à la variabilité interindividuelle, à la multiplicité des facteurs impliqués (cliniques, biologiques, environnementaux) et à l'interaction dynamique entre ces éléments.

Toutefois, l'intelligence artificielle pourrait combler cette lacune en offrant des prédictions personnalisées et plus précises du risque. [99,100]

Ces dernières années, plusieurs outils d'apprentissage automatique ont été développés afin d'être utilisés dans la stratification des risques.

❖ Les Urgences Chirurgicales :

Le modèle POTTER (Prédictive Optimal Trees in Emergency Surgery Risk), fondé sur l'intelligence artificielle, a été conçu pour prédire la mortalité et la morbidité postopératoires en utilisant des données provenant de près de 400 000 patients dans le cadre du National Surgical Quality Improvement Program (NSQIP). Cet algorithme de machine learning permet une évaluation rapide et fiable du risque chez les patients.

Une étude prospective a été menée au niveau de l'Hôpital de Sorocaba (Brésil), entre novembre 2020 et juillet 2021, afin de valider le modèle POTTER dans une population de 194 patients opérés en urgence. L'échantillon était composé de deux groupes :

- 169 patients opérés pour des pathologies non traumatiques,
- 25 patients opérés à la suite de traumatismes.

Les données des patients ont été collectées à partir des dossiers médicaux, y compris les comorbidités préopératoires et les diagnostics à l'admission.

Tableau II : Caractéristiques démographiques et comorbidités des patients

Paramètres :	Nombre de patients (%) :
Sexe (H/F)	112 (57,7%) / 82 (42,3%)
Âge médian	54 ans
Diabétiques	39 (20%)
Fumeurs	58 (30%)
Hypertendus	92 (47,4%)

Les diagnostics d'admission incluaient l'appendicite aiguë (50 cas), la cholécystite aiguë (21 cas), les perforations abdominales (21 cas), ainsi que diverses affections tumorales, infectieuses et traumatiques nécessitant une prise en charge chirurgicale immédiate.

Les performances de POTTER ont été comparées avec d'autres outils prédictifs largement utilisés, tels que le NSQIP : Surgical Risk Calculator (SRC) et ESS115. Le modèle a montré une précision prédictive supérieure pour la mortalité et la morbidité postopératoire à 30 jours dans la population étudiée. [101]

Tableau III : Comparaison des modèles prédictifs

Modèle	Précision prédictive (Mortalité)	Précision prédictive (Morbidité)
POTTER	85%	83%
NSQIP Surgical Risk Calculator	80%	75%
ESS115 (Emergency Surgery Score)	78%	74%

Le modèle POTTER a prouvé sa robustesse et son efficacité dans la prédiction des risques de complications en chirurgie d'urgence, tant pour les patients traumatisés que non traumatisés.

Grâce à ses performances supérieures par rapport à d'autres modèles, POTTER pourrait devenir un outil essentiel pour la stratification du risque chirurgical en chirurgie viscérale, contribuant à améliorer la gestion des patients et la réduction des complications.

❖ **Tumeurs hépatiques :**

La résection chirurgicale constitue une approche fondamentale dans le traitement du carcinome hépatocellulaire (CHC), cependant, la récurrence postopératoire peut altérer les résultats chirurgicaux et le pronostic des patients.

Dans ce cadre un algorithme d'apprentissage automatique a été élaboré dans le but de prédire la mortalité postopératoire chez ces patients. En se basant sur l'analyse du bilan préopératoire des patients atteints de carcinome hépatocellulaire (CHC), comprenant principalement cinq marqueurs biologiques : Aspartate aminotransférase (ASAT), Alanine aminotransférase (ALAT), Alpha-fœtoprotéine (AFP), Bilirubine totale, LC3 (Light Chain 3, impliquée dans le processus d'autophagie).

Le modèle a démontré une précision élevée de 78,6 %, soulignant l'efficacité de l'intelligence artificielle dans la prédiction de la mortalité postopératoire chez les patients atteints de carcinome hépatocellulaire (CHC). [102]

❖ **Pancréatite nécrosante :**

La pancréatite nécrosante survient chez environ 20 % des patients atteints de pancréatite aiguë (PA). La ligne directrice actuelle pour la prise en charge de la pancréatite nécrosante recommande de différer la chirurgie jusqu'à quatre semaines ou plus après la présentation initiale de la nécrose pour permettre la formation d'une paroi autour des lésions.

Cependant, certains patients atteints de pancréatite nécrosante décéderont avant l'intervalle de quatre semaines suivant le début de la PA. Par conséquent, identifier ces patients représente un problème urgent à résoudre.

À l'Hôpital de l'Ouest de Chine de l'Université du Sichuan, des méthodes de machine learning et de deep learning ont été utilisées pour extraire les caractéristiques cliniques des patients atteints de pancréatite nécrosante infectée ayant subi une intervention chirurgicale précoce.

Ils ont analysé les liens entre le traitement chirurgical précoce, la défaillance organique, l'infection et les prédicteurs cliniques, et ont identifié les facteurs clés associés à la mortalité des patients ayant subi une chirurgie précoce (< 4 semaines) ou tardive (\geq 4 semaines).

Les modèles de machine learning développés ont démontré leur capacité à prédire de manière efficace le moment de l'intervention chirurgicale, ainsi que les facteurs déterminants liés au timing de la chirurgie et à la survie postopératoire. [103]

L'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale, notamment à travers les modèles d'apprentissage automatique, permet de renforcer la stratification des risques en prédisant la mortalité postopératoire et en optimisant le moment des interventions.

Cela s'avère particulièrement utile dans des contextes cliniques complexes tels que les urgences chirurgicales (appendicites, cholécystites, perforations abdominales etc), les tumeurs hépatiques et la pancréatite nécrosante en particulier, améliorant ainsi la gestion des risques et la qualité des décisions cliniques.

1.2.2. Prediction Du Temps Opérateur :

Les salles d'opération représentent des services parmi les plus coûteux des hôpitaux, et l'estimation de la durée des interventions est essentielle pour optimiser leur efficacité.

Traditionnellement, les chirurgiens ou les unités de programmation font appel à leur expérience pour déterminer le temps nécessaire à chaque opération, mais cette méthode peut introduire des biais, comme la surestimation des durées, ce qui entraîne des coûts supplémentaires.

Cependant, l'intelligence artificielle s'émerge comme un outil révolutionnaire dans ce domaine. En analysant les données cliniques et historiques des patients, l'IA peut prédire de manière plus précise la durée des interventions, optimisant ainsi la planification et la gestion des ressources hospitalières. Grâce à cette approche, il est possible non seulement d'améliorer l'efficacité des prises en charge, mais aussi de réduire les coûts en évitant les erreurs d'estimation du temps opératoire.[104]

Dans ce cadre, une étude a été réalisée pour prédire la durée des interventions chirurgicales en utilisant des techniques avancées d'apprentissage automatique. Les données historiques de 2004 à 2019 provenant d'un hôpital universitaire de Bogotá, en Colombie, ont été utilisées pour entraîner ces modèles. L'objectif était d'analyser ces données et d'estimer la durée des interventions, avec une évaluation de la précision des prédictions et du temps nécessaire pour leur calcul.

Les résultats ont révélé que les modèles prédictifs permettaient de prévoir la durée des interventions avec une erreur variant entre 26 et 37 minutes. L'un des modèles a obtenu une erreur de prédiction particulièrement faible de 26 minutes, avec un temps d'entraînement rapide de 3,16 minutes et un temps de test de 0,49 minute. Ce modèle a également surpassé la méthode traditionnelle basée sur l'expérience. En conclusion, l'étude a démontré que l'apprentissage automatique peut significativement améliorer la précision des prévisions de la durée des interventions chirurgicales par rapport aux méthodes traditionnelles. [105]

1.2.3. La Simulation Chirurgicale et la Visualisation en 3D :

L'intelligence artificielle joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité de la simulation chirurgicale, qui devient de plus en plus un outil populaire pour enrichir l'expérience de formation des chirurgiens. Cela couvre tout le spectre, de la facilitation de la planification préopératoire à la visualisation et l'orientation intra-opératoires, dans le but ultime d'améliorer la sécurité et la prise en charge chirurgicale des patients.

Plusieurs technologies de visualisation chirurgicale actuellement utilisées pour l'éducation anatomique et la planification pré opératoire reposent sur différents algorithmes d'IA.

Cependant, la visualisation en 3D a constitué une avancée majeure dans la simulation chirurgicale à travers toutes les spécialités chirurgicales, allant de la neurochirurgie et de l'orthopédie à la chirurgie maxillo-faciale, plastique et viscérale. Cette demande universelle pour la planification pré chirurgicale en 3D et ses progrès constants depuis les années 1980 témoignent des avantages considérables en termes de réduction de la durée de l'intervention, des pertes sanguines, de la durée d'hospitalisation tout en améliorant la survie des patients. [106]

a. La Planification Chirurgicale Traditionnelle :

Dans la planification chirurgicale, les chirurgiens doivent compter sur leur expertise visuelle et leur imagination pour combler le fossé entre les coupes tomographiques (2D) et l'anatomie (3D) qu'ils manipulent pendant l'intervention.

En conséquence, une décision chirurgicale au cours du processus de planification repose sur une convergence des aptitudes graphiques et de l'expertise anatomique que les chirurgiens exécutent traditionnellement de manière cognitive. Cela nécessite une formation approfondie et continue, avec le risque que les images 2D ne soient pas correctement traduites en représentations mentales et, par conséquent, sur le corps du patient. [107]

Les techniques utilisées afin de créer des simulations en 3D à partir d'images 2D repose sur les réseaux neuronaux convolutifs (CNN).

L'IA peut compléter cette méthode en facilitant la segmentation 3D et l'annotation anatomique. De plus, l'IA joue un rôle crucial en facilitant des modalités de visualisation avancées telles que l'impression 3D, la simulation en réalité virtuelle (RV) et l'environnement de réalité mixte.

b. La Réalité Virtuelle (RV) et la Réalité Augmentée (RA) :

Comme définition, la réalité virtuelle (RV) est un domaine majeur et étendu de la technologie de l'information (TI). La RV permet de représenter un concept spatial tridimensionnel (3D) à l'aide d'un ordinateur et d'autres dispositifs avec des capacités de simulation d'une variété de sensations telles que le toucher, la vision et l'ouïe, permettent de fournir des réponses simulées à l'utilisateur.

Grâce à l'équipement compatible avec la RV, un utilisateur peut interagir, contrôler et gérer des objets appartenant à un environnement virtuel. Dans ce contexte, le système de RV peut être considéré comme un monde artificiel et spatial en 3D du point de vue de l'utilisateur. [108]

La capacité à représenter des informations en 3D, l'attitude de l'utilisateur envers l'interaction homme-ordinateur, et l'immersion de l'utilisateur dans le monde virtuel font de la RV un système distinct des autres systèmes de simulation. Ces systèmes de réalité virtuelle (RV) reposant sur trois concepts clés, à savoir l'Interaction, l'Immersion et l'Imagination, qui sont complémentaires les uns des autres. [108]

Il y'a plusieurs types de réalité virtuelle mais les plus fameuses sont : La Réalité Immersive et la Réalité Augmentée.

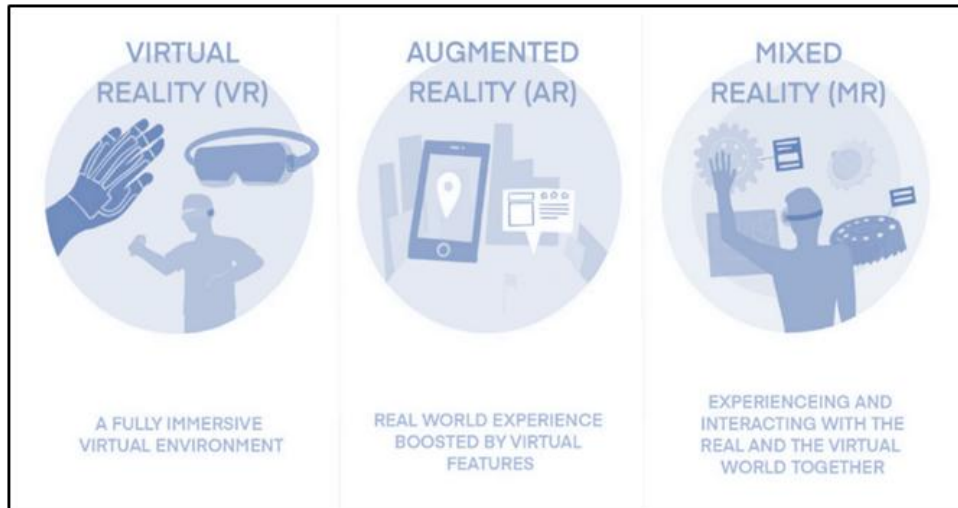


Figure 42. Différence entre Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée et Réalité Mixte. [109]

✓ **La réalité immersive :**

Pour ce type de RV on utilise des casque de visualisation (Head Mounted Display ou HMD) et des gants de données (data gloves), isolant la vision et les autres sensations de l'utilisateur, ce qui fait de lui un participant actif dans le système virtuel. [108]

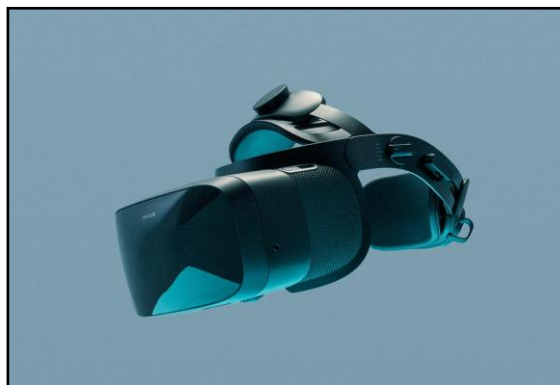


Figure 43. Casque de visualisation : Varjo Aero. [110]

✓ **La réalité distribuée :**

C'est un réseau d'environnements virtuels qui peut connecter un grand nombre d'utilisateurs à travers divers environnements virtuels situés dans différents lieux physiques via des réseaux de communication. [108]

✓ **La réalité augmentée :**

Dans ce type les images virtuelles sont superposées à un objet réel, permettant à l'utilisateur d'obtenir des informations en temps réel [108] . Contrairement aux autres types de réalité virtuelle qui remplacent la vision de l'opérateur, la RA utilise un dispositif visuel transparent pour ajouter des couches d'objets virtuels à l'environnement réel. [111]

✓ **La réalité mixte :**

La réalité mixte ou RM est un hybride de la RA et de la RV, dans lequel les images réelles et virtuelles sont entrelacées, permettant l'interaction et la manipulation tant dans les environnements réels que virtuels.

La réalité mixte (RM) est une technologie novatrice qui a suscité un intérêt croissant, car elle surmonte les limitations de la réalité augmentée (RA), comme l'incapacité d'interagir avec des paquets de données 3D, ainsi que celles de la réalité virtuelle (RV), qui exclut l'environnement réel.[112]

Les interventions chirurgicales à haut risque, comme les hépatectomies étendues et les résections hépatiques complexes, doivent être planifiées par une équipe multidisciplinaire vu leur potentiel considérable de morbidité et de mortalité.

La planification chirurgicale assistée par ordinateur a démontré sa capacité à identifier correctement l'anatomie, la pathologie spécifiques de chaque patient et à faciliter le choix des techniques chirurgicales appropriées dans les procédures à haut risque et les cas complexes. [113]

Plusieurs programmes et systèmes intelligents de réalité virtuelles étaient développées montrant leur faisabilité et leur avantages dans le cadre de la planification préopératoire des interventions hépatiques.

Une étude a été menée pour explorer l'application de la réalité virtuelle (RV) dans la planification chirurgicale des tumeurs hépatiques. L'objectif était de créer un environnement collaboratif immersif qui permette aux chirurgiens de spécifier, modifier et évaluer les marges de résection en temps réel, tout en visualisant des cartes de risques et les contours des tumeurs.

Ce système a intégré des étapes clés, telles que l'initialisation des données, la spécification de la résection virtuelle, la modification de la résection et l'estimation du volume.

La cartographie des risques, qui détermine la distance exacte des tumeurs aux vaisseaux sanguins et à la surface de résection, permet aux chirurgiens de mieux préserver les marges de résection et d'optimiser les résultats. Cette technologie collaborative permet également aux équipes de collaborer à distance, ce qui est particulièrement bénéfique pour les interventions complexes.

Un premier retour des chirurgiens a souligné l'utilité du système pour améliorer la compréhension spatiale et la manipulation, avec des commentaires positifs concernant sa précision et sa facilité d'utilisation.[114]



Figure 44. La planification chirurgicale impliquant des utilisateurs dans le monde réel. [114]

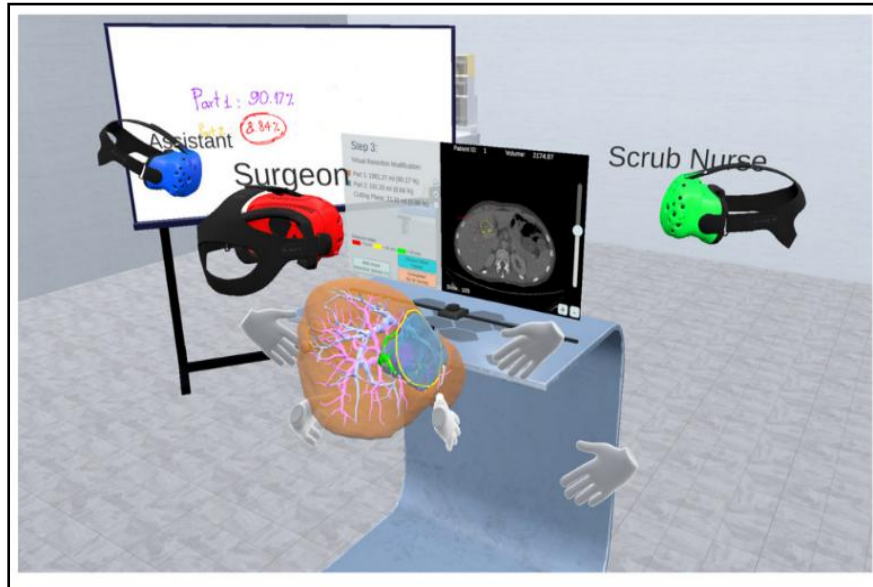


Figure 45. Les présentations des manipulateurs dans l'environnement immersif (chirurgien : couleur rouge, assistant : couleur bleue, et infirmière instrumentiste : couleur verte). [114]

En somme, cette étude confirme le potentiel prometteur de la réalité virtuelle dans la planification chirurgicale des tumeurs hépatiques, offrant une précision accrue et une collaboration facilitée.

✓ **IMHOTEP :**

C'est un système interactif de réalité virtuelle créé pour simplifier la visualisation des données et la planification des gestes chirurgicales par la création d'un environnement de réalité virtuelle (RV) intuitif et facile à naviguer via des casques de visualisation commercialement disponible, l'Oculus Rift™ et grâce aux technologies modernes des jeux vidéo, l'interaction en temps réel est plus facile et la perception de la profondeur est bien améliorée. [115]

L'espace virtuel est divisé en trois zones : un espace 3D central pour afficher les données anatomiques, un écran courbé 2D pour les informations supplémentaires, et une palette d'outils permettant de manipuler les paramètres des outils via un contrôleur. Cette organisation optimise l'utilisation de l'espace et facilite l'accès aux données et outils. [115]



Figure 46. Exemple d'environnement de réalité virtuelle depuis l'intérieur de l'Oculus Rift : Informations sur le patient (à gauche), modèle 3D (au centre), et imagerie sectionnelle originale (à droite). [113]

IMHOTEP a été évalué par 158 participants (inclus 35 chirurgiens résidents, 13 chirurgiens praticiens) avec des résultats comme suivant : Parmi les participants 89,9 % personnes ont trouvés que le système est agréable à utiliser.

Ils ont convenu que les cas chirurgicaux complexes, en particulier, pouvaient être évalués de manière plus efficace (94,3 %) et plus rapide (84,8 %) avec la réalité virtuelle par rapport aux méthodes traditionnelles d'affichage en 2D, démontrant que la réalité virtuelle promet un grand potentiel pour améliorer la planification chirurgicale, ce qui pourrait contribuer à améliorer les prises en charges des patients. [113]

c. La Réalité Mixte (RM) :

L'intégration de la réalité mixte holographique dans la phase pré opératoire représente une avancée significative pour la chirurgie viscérale, en permettant une visualisation améliorée des structures anatomiques et en facilitant la planification chirurgicale.

Le logiciel ARTICOR1 est une avancée technologique majeure en chirurgie viscérale, offrant une plateforme de simulation 3D personnalisée à partir de données tomodensitométriques (TDM).

Il permet la reconstruction détaillée des structures anatomiques des patients, créant ainsi des modèles holographiques interactifs.

Cette technologie révolutionnaire a été appliquée avec succès à 10 cas complexes de cancer colorectal, utilisant le système HoloLens MD pour offrir une visualisation en réalité mixte. L'une des principales applications de ARTICOR1 est sa capacité à détecter des anomalies vasculaires qui pourraient ne pas être visibles sur les images traditionnelles.



Figure 47. Casque de visualisation : HoloLens MD. [116]

Par exemple, dans certains cas, la reconstruction holographique a révélé l'absence de l'artère colique gauche et une flexion splénique anormale, modifiant ainsi les approches chirurgicales et permettant de préserver des structures vitales, comme l'artère mésentérique inférieure lors d'une colectomie gauche.

En outre, le logiciel a permis une localisation plus précise des tumeurs. Dans un cas spécifique, la reconstruction 3D a corrigé la localisation erronée de la tumeur, initialement identifiée dans le côlon descendant par la TDM, confirmant sa véritable position dans la flexion splénique. Ce niveau de précision a permis d'ajuster l'approche chirurgicale, passant d'une hémicolectomie à une résection ciblée de la flexion splénique. [117]

Dans 2 autres cas, la technique a été utilisée pour évaluer l'invasion locorégionale de cancer rectal, et chez un jeune homme, pour évaluer l'étendue de l'invasion méso-rectale, qui n'était pas clairement visible en IRM (Figure 48).

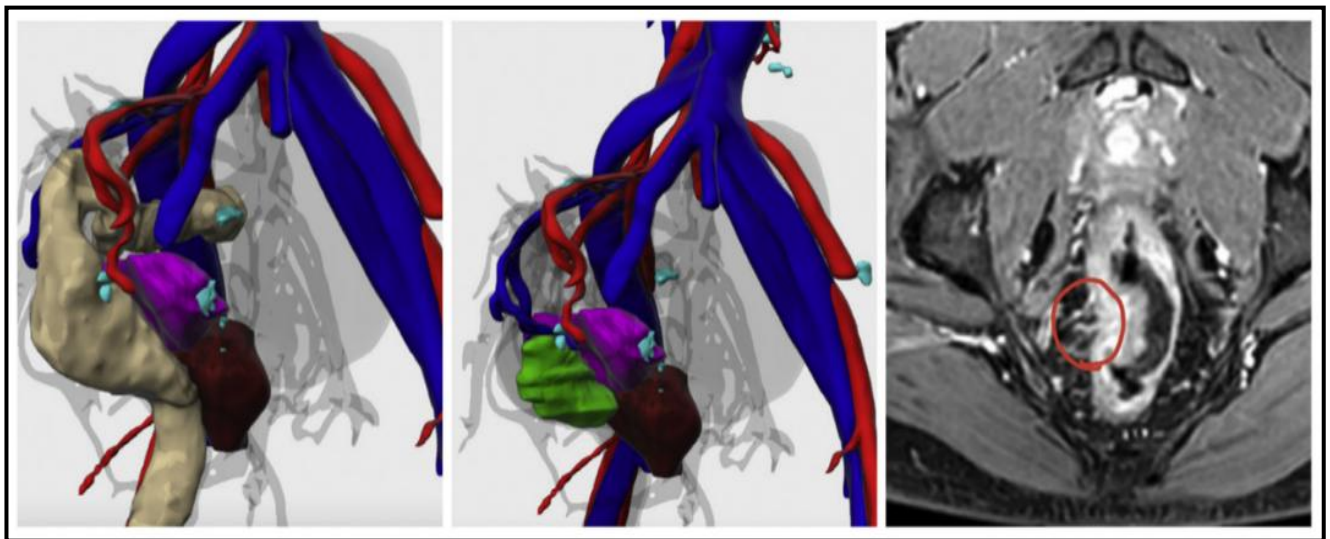


Figure 48. La reconstruction 3D de l'adénocarcinome rectal. [117]

Dans un autre cas, un patient présentant un adénocarcinome du côlon droit semblait, sur les images de TDM, envahir le foie. Cependant, avec l'assistance de la réalité mixte, en soustrayant les organes environnants, il a été observé et démontré que le foie n'était finalement pas envahi (figure 49) .[117]

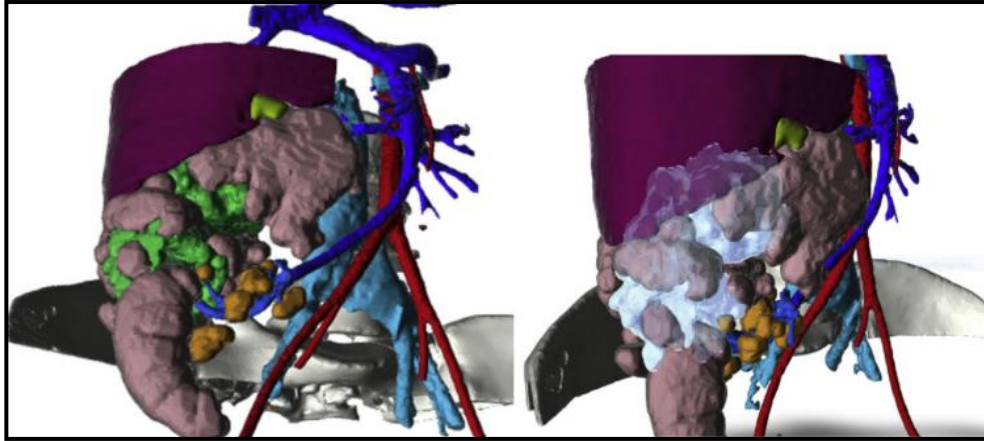


Figure 49. La reconstruction 3D de l'adénocarcinome du côlon droit. [117]



Figure 50. Visualisation holographique pour la planification préopératoire. [117]

En somme, ARTICOR1, en combinant la puissance de la réalité mixte avec des données anatomiques précises, ouvre de nouvelles perspectives dans la planification pré opératoire, offrant aux chirurgiens un outil de haute technologie pour améliorer la précision des interventions et la sécurité des patients. [117]

En chirurgie viscérale, la réalité virtuelle et la réalité mixte révolutionnent la planification préopératoire en permettant une visualisation tridimensionnelle précise des structures anatomiques. La réalité virtuelle aide à anticiper les complications et à affiner les techniques chirurgicales, tandis que la réalité mixte, par l'intégration d'images réelles et virtuelles, améliore la compréhension spatiale et permet des ajustements en temps réel. Ces technologies optimisent la sécurité et la précision des interventions, en particulier dans les cas complexes comme les résections hépatiques.

d. L'impression 3D :

Initialement, l'impression 3D était principalement adoptée par des autres spécialités telles que la chirurgie maxillo-faciale, l'orthopédie et la neurochirurgie, probablement en raison des reconstructions osseuses complexes et de l'utilisation fréquente de prothèses inhérentes à ces disciplines.

Ces dernières années, le domaine de la chirurgie viscérale a commencé à adopter cette technologie pour améliorer les soins directs aux patients. [118]

▪ **La Spléno-pancréatectomie distale :**

La spléno-pancréatectomie distale est une procédure chirurgicale complexe qui nécessite une précise planification préopératoire.

Une étude de cas a été réalisée sur un patient âgé de 46 ans présentant une masse pancréatique distale de 5 cm de diamètre, nécessitant une intervention chirurgicale. Afin d'optimiser la planification préopératoire et de fournir une référence visuelle pendant l'opération, une réplique anatomique des organes du patient a été créée à l'aide de la technologie intelligente d'impression 3D. [119]

Les images TDM abdominales du patient, obtenues en raison de symptômes non spécifiques tels que des douleurs abdominales hautes, des ballonnements et des vomissements occasionnels, ont été utilisées pour élaborer un modèle numérique détaillé et à l'aide de logiciels open-source, les organes d'intérêt, notamment le pancréas, la rate et les vaisseaux adjacents, ont été segmentés et reconstruits en 3D. [119]

Une fois le modèle numérique finalisé, il a été imprimé en 3D (Figure 52), produisant une réplique tangible et précise de l'anatomie unique du patient. Ce modèle incluait le pancréas, la rate, l'aorte, la veine cave et le système veineux portal, offrant ainsi une visualisation réaliste pour une meilleure planification chirurgicale.

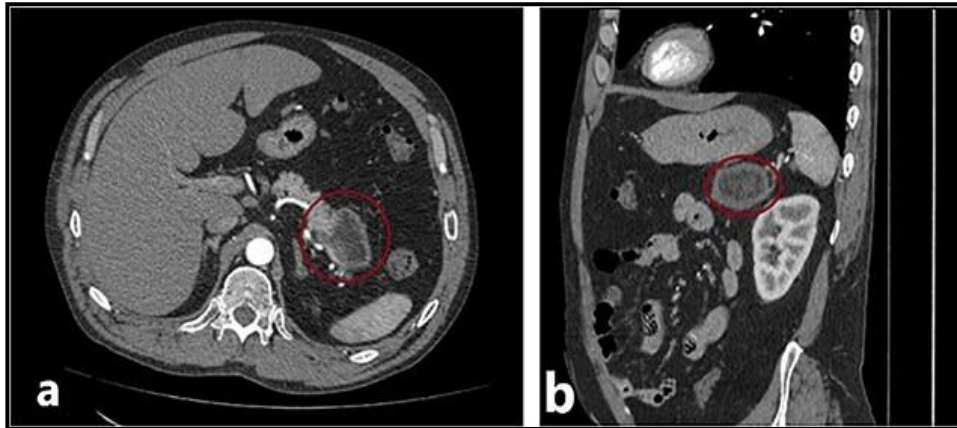


Figure 51. (a) et (b) : Images TDM axiales et sagittales montrant la tumeur pancréatique distale.[119]

Le modèle imprimé en 3D a été présenté à l'équipe chirurgicale, qui a exprimé l'amélioration significative de leur compréhension des relations spatiales complexes entre les organes concernés. Contrairement aux images TDM 2D, le modèle physique a offert une expérience tactile précieuse, facilitant l'identification des marges de résection optimales et la planification de l'approche des structures vasculaires critiques.[119]

Pendant l'intervention, la veine mésentérique inférieure a servi de repère clé pour orienter la dissection, confirmant la pertinence des repères identifiés sur le modèle imprimé. La spléno-pancréatectomie distale a été réalisée avec succès, et l'examen de la pièce opératoire a confirmé la résection adéquate du pancréas distal et de la rate.[119]

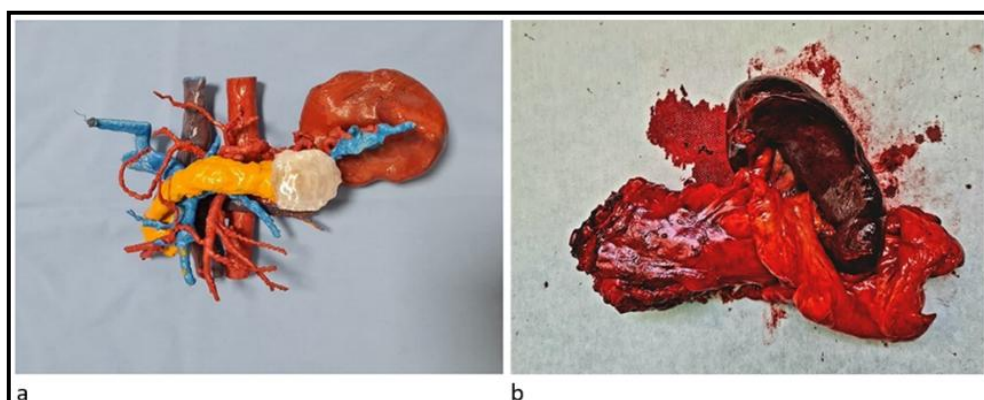


Figure 52. (a) La pièce imprimée en 3D de l'anatomie du patient (b) La pièce réséquée (pancréas distal et rate). [119]

Cette étude a montré que l'utilisation de l'impression 3D dans la planification chirurgicale de la spléno-pancréatectomie distale a permis de réduire significativement la durée de l'intervention, réalisée en seulement 2,5 heures, bien en dessous de la durée médiane généralement observée pour des opérations similaires.

Cette approche a démontré son potentiel pour optimiser les stratégies chirurgicales, améliorer les résultats des patients et faire progresser la chirurgie abdominale. [119]

- **La mésentérectomie étendue :**

Un autre exemple d'application de l'impression 3D se retrouve en chirurgie colorectale.

Cette technologie a démontré particulièrement son utilité dans les chirurgies complexes, telles que la mésentérectomie étendue pour le cancer du côlon, en améliorant la précision et la maîtrise de l'anatomie, ce qui optimise la préparation chirurgicale et favorise le succès de l'intervention.

Une étude été mener avec un objectif d'évaluer les différences dimensionnelles linéaires des repères anatomiques de l'artère et de la veine mésentériques supérieures entre les modèles virtuels 3D, les impressions 3D, et les mesures intra opératoires.

En évaluant quatre paramètres essentiels : la distance entre les origines des artères iléocoliques et coliques moyennes, la distance entre la terminaison du tronc gastrocolique et la veine iléocolique, ainsi que les calibres des artères coliques moyennes et iléocoliques.

Les résultats obtenus montrent une forte corrélation des distances inter-artérielles entre les modèles 3D virtuels, les impressions 3D et les mesures intra opératoires.

En revanche, les distances inter-veineuses présentent une corrélation plus faible, reflétant la variabilité intrinsèque des veines in situ. L'étude conclut que les modèles 3D offrent une précision satisfaisante pour les structures artérielles, mais une précision limitée pour les structures veineuses. [120]

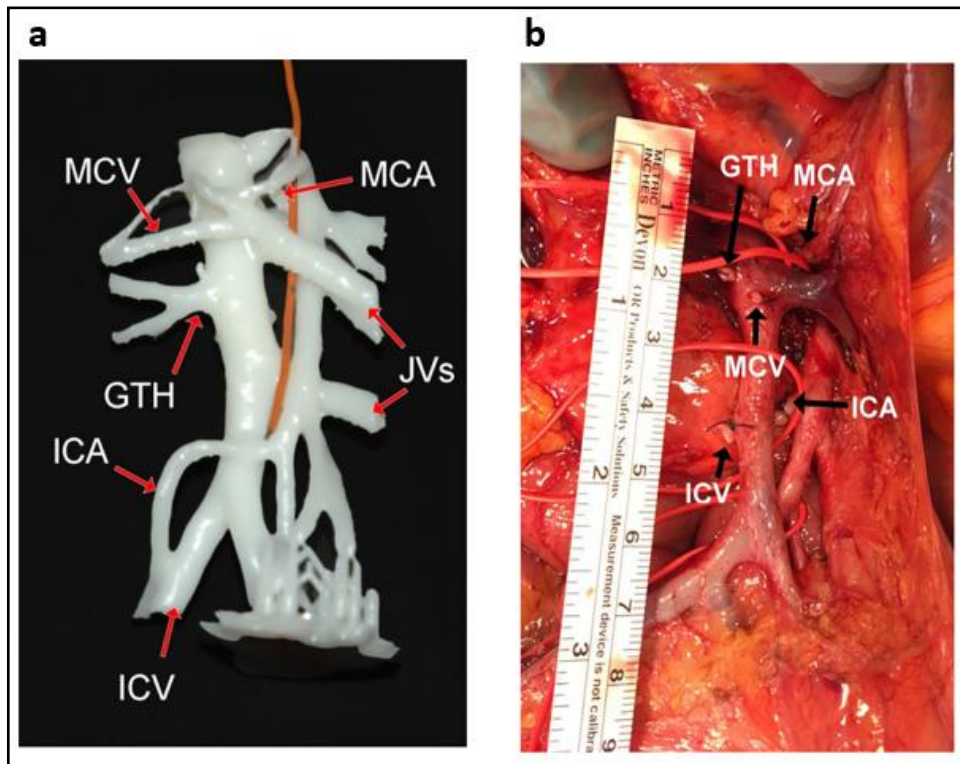


Figure 53. (a) modèle imprimer en 3D, (b) image intra opératoire prise à l'aide d'une règle en papier stérile, avec une échelle en mm. Les structures mesurées comprenaient la veine colique moyenne (MCV), l'artère colique moyenne (MCA), le tronc gastrocolique de Henlé (GTH), les veines jéjunales (IVs), l'artère iléocolique (ICA) et la veine iléocolique (ICV). [120]

En conclusion, bien que l'impression 3D soit largement utilisée dans d'autres spécialités chirurgicales, son application en chirurgie des tissus mous, comme la chirurgie viscérale, reste limitée.

Cela s'explique par la complexité des structures des tissus mous, les défis liés à la reproduction de leurs caractéristiques détaillées, et la disponibilité restreinte de matériaux biocompatibles adaptés à l'impression 3D.

Toutefois, malgré ces défis, les études récentes montrent que l'intégration de l'impression 3D dans les procédures chirurgicales complexes présente des avantages significatifs, notamment pour la planification préopératoire. [119]

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la phase pré opératoire en chirurgie viscérale a considérablement amélioré la précision diagnostique, la planification chirurgicale et la gestion des risques. Les technologies d'IA, telles que les systèmes d'aide à la décision, l'apprentissage profond, la réalité virtuelle et l'impression 3D, permettent une approche plus personnalisée et efficace des soins chirurgicaux.

Les systèmes d'aide à la décision analysent rapidement les données cliniques pour proposer des recommandations adaptées, tandis que l'apprentissage profond optimise l'interprétation des examens d'imagerie, comme les radiographies, les TDMs et les IRMs, en détectant des anomalies avec une précision notable. Ces outils aident les chirurgiens à mieux comprendre les cas complexes et à anticiper les défis opératoires.

En outre, l'IA facilite la stratification des risques et la prédiction des complications postopératoires, permettant une gestion plus fine des interventions. Cependant, la réalité virtuelle et l'impression 3D offrent une visualisation détaillée des structures anatomiques, améliorant la planification préopératoire et la formation des équipes chirurgicales.

Ces avancées technologiques optimisent non seulement les résultats pour les patients, mais aussi l'efficacité des équipes, réduisant les temps d'intervention et les coûts associés.

En somme, l'IA est devenue un outil indispensable pour relever les défis complexes de la chirurgie viscérale moderne, ouvrant la voie à une chirurgie plus précise et personnalisée.

2. La Phase Intra Opératoire :

2.1. Intelligence Artificielle en Anesthésie :

En anesthésie, la recherche se concentre sur l'analyse prédictive et l'utilisation de l'apprentissage automatique pour créer des outils d'aide à la décision en temps réel. Ces outils permettent aux anesthésistes d'anticiper les problèmes et d'agir de manière proactive, en particulier dans les contextes intra opératoires et en soins intensifs, contrairement à d'autres domaines comme la radiologie et la pathologie, où la vision par machine est plus prédominante.[121]

L'intelligence artificielle possède un potentiel considérable pour transformer les soins anesthésiques, en optimisant les résultats pour les patients, en réduisant les coûts et en améliorant l'efficacité de l'administration de l'anesthésie.

a. Surveillance des patients et prédiction des complications :

Parmi les applications de l'IA dans la surveillance des patients en anesthésie, on retrouve la surveillance en temps réel de plusieurs paramètres vitaux, l'analyse prédictive des résultats, la détection d'anomalies, la stratification des risques des patients et la documentation automatisée.[122]

Avec une précision impressionnante de 84,2 %, un modèle développé pour prédire l'hypotension post-induction tardive s'est révélé particulièrement performant.

Cette complication, qui survient entre l'intubation trachéale et l'incision chirurgicale, représente un défi majeur en anesthésie. Pour concevoir ce modèle, des données cliniques de 126 patients ont été exploitées, accompagnées des signaux de surveillance intra opératoire capturés lors de la phase précoce de l'induction anesthésique. L'intégration de ces informations, y compris les données des moniteurs d'anesthésie générale, a permis d'aboutir à un modèle robuste, capable de fournir des prédictions précises et fiables. [123]

b. Administration de l'anesthésie :

L'IA peut optimiser l'administration de l'anesthésie en ajustant précisément les doses et la distribution des agents anesthésiques en fonction des caractéristiques du patient et des exigences chirurgicales.

Un système intelligent basé sur un réseau de neurones convolutifs a été utilisé pour développer un modèle "d'anesthésiste intelligent" pour le dosage intra-opératoire de médicaments anesthésiques personnalisés (propofol et rémifentanyl) pendant l'anesthésie générale. Le niveau de médication établi par ce système s'est avéré comparable à celui administré par un anesthésiste. Ce contrôle intelligent de l'anesthésie a montré une cohérence avec la pratique clinique. [124]

c. L'estimation de la profondeur de l'anesthésie :

L'intégration de l'IA a permis d'estimer la profondeur de l'anesthésie, qui est une phase cruciale.

Dans ce cadre, une méthode innovante basée sur un réseau neuronal profond a été conçue pour distinguer les différents états d'anesthésie, en utilisant quatre paramètres dérivés de la variabilité de la fréquence cardiaque extraits des électrocardiogrammes (ECG) de 23 patients. Le réseau neuronal profond a utilisé l'évaluation clinique du niveau de conscience réalisée par cinq anesthésistes comme référence pour déterminer l'état anesthésique des patients. Les résultats ont montré que le modèle atteignait une précision de 90,1 %. Cette approche basée sur l'IA a ainsi montré une meilleure capacité à prédire l'état anesthésique, marquant une avancée dans l'optimisation de la surveillance anesthésique. [125]

Grâce à des modèles d'apprentissage automatique, l'IA permet de prédire des complications telles que l'hypotension post-induction, une problématique fréquente dans les chirurgies viscérales complexes. Elle ajuste également les doses anesthésiques en fonction des paramètres vitaux spécifiques du patient, garantissant une anesthésie plus précise et adaptée.

2.2. Intelligence Artificielle et Robots Chirurgicaux :

Le domaine de la chirurgie viscérale et ses sous-spécialités ont été profondément transformés par l'introduction de la technologie robotique, permettant la réalisation de procédures mini-invasives. En effet, des sous-spécialités telles que la chirurgie colorectale, hépatobiliaire, pancréatique, oncologique gastrique, bariatrique, du haut appareil digestif et de la hernie ont adopté la chirurgie robotique et mené des recherches approfondies pour évaluer son impact sur les résultats des patients. [126]

Par définition, la chirurgie robotique est une technique mini-invasive qui repose sur l'utilisation de bras robotiques contrôlés par ordinateur. Cette approche a révolutionné la chirurgie moderne en offrant des avantages significatifs par rapport à la chirurgie laparoscopique traditionnelle. [127]

En effet, la chirurgie robotique se distingue par une précision accrue, une visualisation optimisée et une réduction notable des tremblements opératoires ce qui se traduit par plusieurs bénéfices pour les patients, notamment des incisions plus petites, une perte de sang réduite, une récupération accélérée et une diminution de la douleur. [127]

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la chirurgie robotique représente une révolution majeure dans le domaine chirurgicale, ouvrant des perspectives prometteuses pour améliorer la précision, l'efficacité et l'accessibilité des interventions.

Grâce à l'IA, les robots chirurgicaux peuvent désormais analyser des données complexes en temps réel, adapter leurs actions en fonction des spécificités de chaque patient et même anticiper les complications potentielles.

Cette capacité à traiter et à interpréter des informations avec une rapidité et une précision inégalées permet de réduire les erreurs humaines et d'optimiser les gestes chirurgicaux, offrant ainsi des résultats plus fiables et reproductibles. De plus, l'automatisation de certaines tâches chirurgicales permet de diminuer la fatigue des chirurgiens, tout en augmentant la sécurité des procédures.

2.2.1. Les Robots Chirurgicaux :

Avant d'aborder cette convergence technologique, une synthèse scientifique des principaux systèmes chirurgicaux robotiques est présentée ci-après :

a. Le Robot ZEUS :

Le robot Zeus est l'un des premiers robots chirurgicaux, c'est un système composé de deux bras robotiques capables de manipuler des instruments chirurgicaux donnent la possibilité de réaliser des interventions chirurgicales en utilisant un contrôle direct ou à distance.

Le système Zeus était équipé d'un dispositif de télécommande assisté par ordinateur, interagissant avec un bras robotique. Pour améliorer la précision des mouvements du bras robotisé durant les opérations, le système intégrait un filtre réduisant les tremblements de la main humaine.

En 2001, le système Zeus a permis aux chirurgiens de réaliser avec succès la première opération "Lindbergh", une intervention à distance effectuée par une équipe de chirurgiens français basée à New York sur un patient situé à Strasbourg, en France. Toutefois, le système Zeus a été abandonné en 2003. [128]

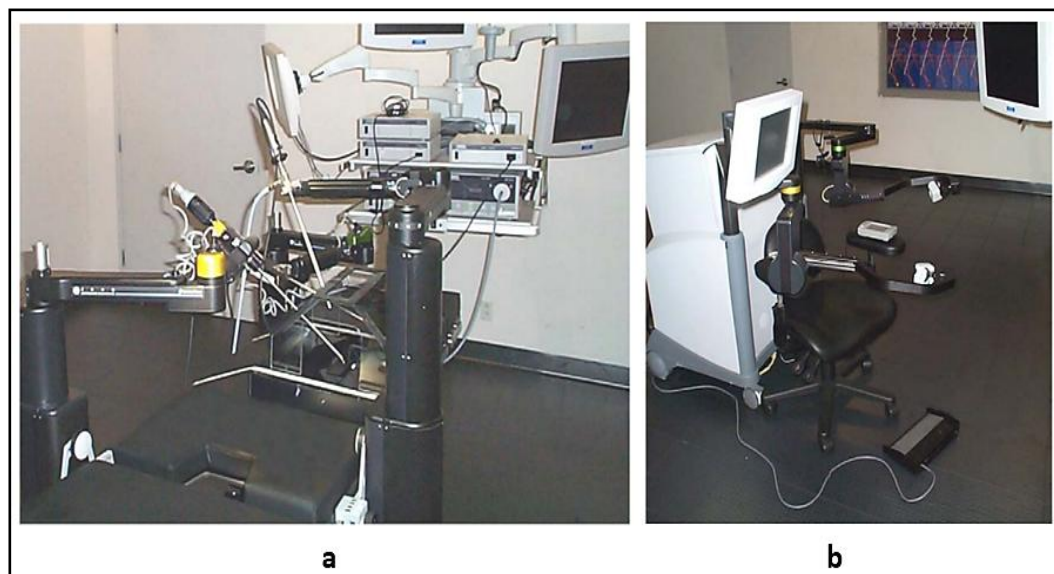


Figure 54. (a) Le robot ZEUS avec (b) la console de manipulation. [129]

b. Le Robot Da Vinci :

Le système chirurgical robotique Da Vinci, conçu par Intuitive Surgical repose sur le principe classique du maître-esclave et est doté de quatre bras, dont trois peuvent porter des instruments chirurgicaux, tandis que le quatrième maintient la caméra.

Dans le modèle le plus récent, Le robot Da Vinci Xi, chaque bras dispose de trois degrés de liberté offrant des degrés de liberté supplémentaires pour une manipulation plus précise et semblable à celle d'un humain. [128]

Avec une console de manipulation qui contient deux caméras offrent une vue magnifiée en 3D du champ opératoire. La console a été conçue en tenant compte des besoins du chirurgien, avec des boucles pour les doigts ajustables, une distance intraoculaire adaptable, un appui-tête rembourré et des barres pour les bras. Le mouvement des instruments est rendu possible grâce à des articulations entraînées par câble situées à l'extrémité distale de l'instrument.

Dès 2020, le robot Da Vinci comptait plus de 5500 installations dans le monde et avait réalisé plus de sept millions de chirurgies. [128]

Le système chirurgicale robotique le plus utilisé aujourd'hui est le robot Da Vinci. [130]

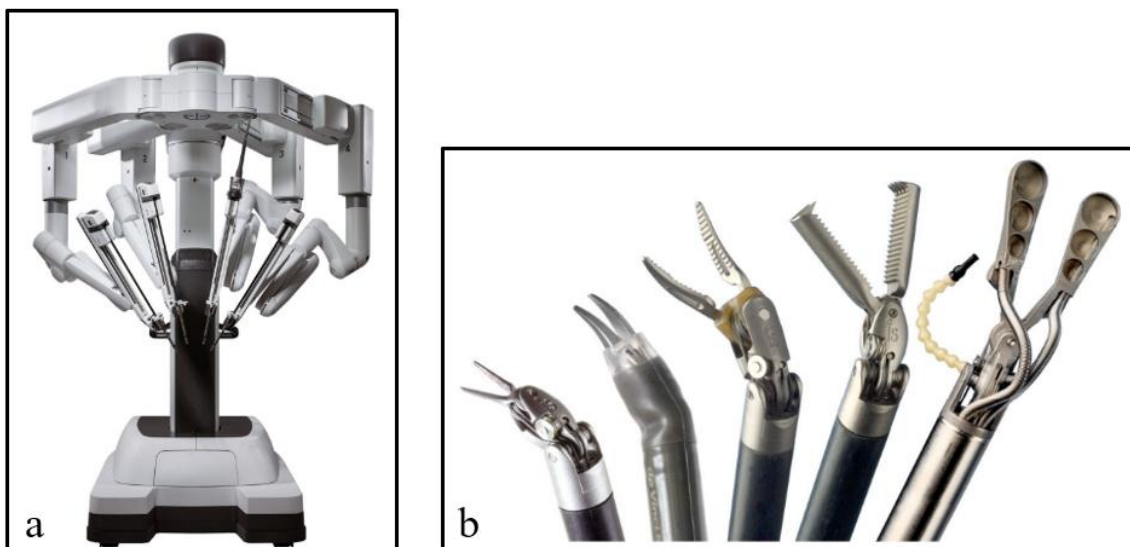


Figure 55. (a) Les bras robotiques du robot da Vinci Xi et (b) les instruments articulés. [131]

Depuis son approbation initiale en 2000, le système a considérablement évolué. Jusqu'à aujourd'hui, la plateforme de chirurgie robotique Da Vinci comprend six modèles : S, Si, Xi, X, SP et 5. Le modèle Xi a été lancé en 2014, suivi du modèle SP en 2018, puis du modèle da Vinci 5 en 2024. [132]



Figure 56. (A) Comparaison des consoles Da Vinci Xi et SP, (B) Comparaison des robots Da Vinci Xi et SP, (C) Les instruments de Da Vinci SP. [133]



Figure 57. Le robot Da Vinci 5. [134]

Le robot Da Vinci a été utilisé dans différentes interventions chirurgicales en chirurgie viscérale avec des résultats satisfaisants.

Lors d'une œsophagectomie pour le cancer de l'œsophage, le robot Da Vinci a présenté plusieurs avantages, tels qu'une observation claire de la lésion et de ses relations avec les tissus environnants, les nerfs et les ganglions lymphatiques. Il a permis une ablation en toute sécurité avec une réduction des lésions nerveuses et des traumatismes. De plus, le système da Vinci permet une intervention avec moins de douleur, de bons résultats, une récupération postopératoire plus rapide et des incisions esthétiques. [135]

En 2021, au sein du département de chirurgie hépatobiliaire et pancréatique de L'Hôpital Universitaire de Kunming, une hépatectomie gauche a été réalisée avec succès et en toute sécurité, à l'aide du robot Da Vinci Xi. [136]



Figure 58. Le robot DA VINCI avec les sites d'introduction des trocars. [136]

Un autre exemple d'utilisation du robot da Vinci et celui d'une patiente âgée de 70 ans, présentant depuis 3 ans une distension abdominale progressive localisée dans le quadrant inférieur droit de l'abdomen, la patiente a été opérée à l'aide du robot Da Vinci, permettant une résection complète de la masse rétropéritonéale. L'examen anatomopathologique a confirmé qu'il s'agissait d'une thyroïde ectopique (TE). La patiente n'a présenté aucun symptôme ni inconfort après son hospitalisation, et les suivis postopératoires réalisés à 1, 3, 6, 9 et 12 mois étaient sans particularité. Ce cas est le premier à rapporter une résection d'une thyroïde ectopique rétropéritonéale rare de grande taille par chirurgie robotique, par le robot Da Vinci. [137]

c. Le Robot Dexter :

Le système Dexter est un système robotique chirurgicale qui comprend une console ergonomique pour le chirurgien, deux modules mobiles équipés de bras robotiques pour instruments, et un module mobile pour l'endoscope.

La console du chirurgien dispose de pédales pour contrôler l'endoscope et ajuster le champ de vision, offrant une grande ergonomie. Les bras robotiques, avec 7 degrés de liberté et 75 degrés d'angulation, permettent d'utiliser divers instruments, notamment des ciseaux monopolaires, des crochets monopolaires, des dissecteurs bipolaires, des pinces et des porte-aiguilles.

Le design compact et modulaire facilite le transport entre les salles opératoires, tout en laissant un espace suffisant pour les assistants chirurgicaux autour du patient.

De plus, le système Dexter est compatible avec les équipements existants de l'hôpital, comme les trocarts laparoscopiques standards et les systèmes optiques 3D, ce qui élimine le besoin d'acheter de nouveaux dispositifs.

Une caractéristique clé du système Dexter est la possibilité de basculer rapidement entre la laparoscopie et la chirurgie assistée par robot, sans nécessité de détacher les bras robotiques.

En appuyant sur un bouton, les bras peuvent être repliés en mode Laparoscopique en 20 secondes en moyenne, permettant un accès facile au patient. Cette flexibilité est particulièrement utile dans des cas où une mobilisation laparoscopique est suivie d'une phase robotique pour compléter l'opération.

Enfin, les poignées stériles de la console sont réutilisables et peuvent être retraitées sur place, respectant les normes en vigueur. [138]

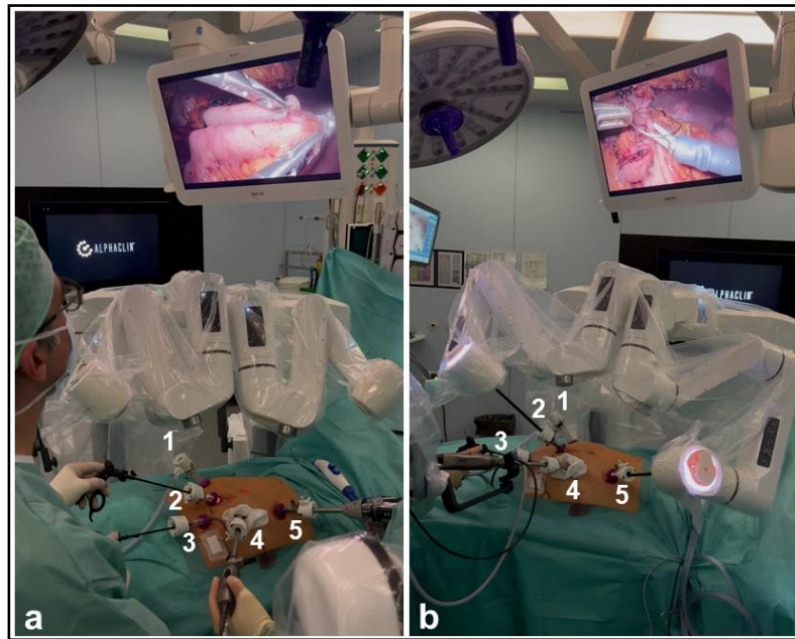


Figure 59. Le système Dexter est montré à la fois en mode LAP (Laparoscopique) et en mode RAS (Chirurgie Assistée par Robot) lors de la même procédure. Les chiffres 1 à 5 indiquent les trocars avec : (a) Les bras Dexter sont repliés en mode LAP ; (b) Les bras Dexter sont connectés en mode RAS.[138]

Entre novembre 2022 et septembre 2023, 56 interventions ont été réalisées avec ce système, principalement des cholécystectomies (n = 15), des réparations de hernie inguinale (n = 18) et des héli colectomies droites (n = 15) etc.

Parmi celles-ci, 64 % ont été entièrement robotisées, tandis que 20 % ont nécessité un recours à la laparoscopie, souvent en raison de collisions des bras ou d'un positionnement inadéquat des trocars. [138]

Le système Dexter peut être mis en œuvre sans difficultés majeures, et des interventions chirurgicales viscérales de complexité simple à moyenne peuvent être réalisées en toute sécurité.

La simplicité et l'accessibilité du système, ainsi que la facilité de transition entre la robotique et la laparoscopie, en font une option particulièrement adaptée aux débutants en chirurgie robotique.

d. Le robot HINOTORI :

Le système robotique Hinotori de Medicaroid est actuellement utilisé au Japon en chirurgie viscérale, gynécologie et urologie. Il a reçu l'approbation réglementaire du Ministère japonais de la Santé pour son utilisation dans les chirurgies viscérale en octobre 2022.

Le système se compose d'une cabine fermée pour le chirurgien, d'une unité opératoire à quatre bras et d'une unité de vision. La cabine ergonomiquement conçue peut être ajustée pour s'adapter à la posture préférée du chirurgien, avec la possibilité de faire pivoter le visualiseur de l'endoscope 3D qui contient un écran haute définition. Les chirurgiens contrôlent la caméra et les instruments à l'aide de deux commandes manuelles et de pédales.

En octobre 2023, la plateforme Hinotori a été utilisée pour réaliser une démonstration de chirurgie à distance, avec la cabine du chirurgien située à Singapour et l'unité opératoire à Nagoya, au Japon, à environ 5000 km de distance. [139]

En Japon, le robot HINOTORI™ a été utilisé pour opérer une patiente de 58 ans présentant une masse dans la queue du pancréas diagnostiquée comme une tumeur neuroendocrine pancréatique. La patiente a consenti à une résection chirurgicale, et une pancréatectomie distale préservant la rate, avec conservation de l'artère et de la veine spléniques, a été réalisée. Aucune erreur irréparable de l'appareil n'a été signalée pendant l'opération. Le temps opératoire a été de 531 minutes et la perte sanguine de 192 ml. Le parcours postopératoire s'est déroulé sans complications majeures. [140]

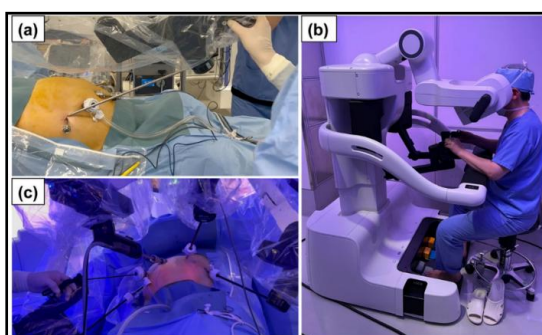


Figure 60. Paramètres du système chirurgical Hinotori : (a) La position de chaque bras robotique, (b) Le chirurgien avec console du robot, (c) Le système sans fixation du Hinotori. [140]

e. Le robot Toumai :

La plateforme chirurgicale robotique Toumai, développée par la société chinoise Shanghai MicroPort MedBot (Group), représente une avancée technologique significative dans le domaine de la chirurgie assistée par robot. Lancée au début des années 2020, cette innovation vise à fournir une alternative plus abordable au système robotique Da Vinci, actuellement dominant sur le marché.

Le système Toumai repose sur un modèle maître-esclave, dans lequel le chirurgien contrôle les bras robotiques depuis une console fermée. La plateforme est équipée de quatre bras robotiques montés sur un chariot mobile, conçus pour manipuler les instruments avec une grande précision.

La plateforme intègre un système optique 3D haute définition, offrant une vision amplifiée et immersive du champ opératoire. Cependant, certaines fonctionnalités avancées, telles que le retour haptique et la technologie de changement automatique de caméra, n'ont pas été spécifiées dans les données disponibles, bien qu'elles soient des caractéristiques standards dans les systèmes robotiques contemporains. Les temps de préparation des interventions avec le système Toumai se sont révélés efficaces, avec une durée médiane rapportée entre 20 et 22 minutes, selon la nature de l'opération. [141]



Figure 61. La plateforme chirurgicale robotique : Toumai. [142]

Un exemple remarquable d'utilisation du robot Toumai en chirurgie viscérale, concerne un patient de 51 ans atteint d'un cancer gastrique de stade T2N0M0.

Ce dernier a bénéficié d'une gastrectomie distale radicale robot-assistée à distance, réalisée grâce à la technologie 5G, le 11 septembre 2023, au Troisième Département de Chirurgie du Quatrième Hôpital de l'Université Médicale de Hebei.

L'intervention, menée avec succès, a enregistré un délai intra opératoire total moyen de 225 ms et un délai aller-retour moyen de 30 ms, sans aucune perte de paquets de données. La durée opératoire a été de 140 minutes, avec une perte sanguine limitée à 20 ml.

Le patient a été hospitalisé pendant six jours et n'a présenté aucune complication postopératoire. Ce cas constitue une première mondiale pour une gastrectomie distale radicale réalisée à l'aide du robot Toumai avec le support de la technologie 5G, démontrant ainsi son potentiel dans la chirurgie robotique à distance. [143]



Figure 62. (a) :La disposition des trocarts du système chirurgical Toumai et (b) :vue postopératoire des incisions. [143]

f. Le robot REVO-I:

La société sud-coréenne Meere Company a conçu en 2015 le système MSR-5000 REVO-I. Ce robot chirurgical fonctionne selon un modèle similaire au robot Da Vinci.

Il est composé d'un chariot opératoire équipé de quatre bras offrant 12 degrés de liberté et pouvant accueillir des instruments réutilisables jusqu'à 20 fois, soit deux fois plus que ceux du Da Vinci. Le système inclut également une console de contrôle pour le chirurgien, dotée d'une vision haute définition (HD) et d'un retour haptique.

La console du REVO-I transmet avec précision les mouvements du chirurgien aux bras robotiques, facilitant ainsi la réalisation des interventions et des alertes en provenance du site opératoire signalant les éventuels problèmes ou imprévus, permettant au chirurgien d'intervenir rapidement. Ce système a été approuvé en août 2017. [128]



Figure 63. Les composants du robot chirurgicale Revo-i. [144]

Le robot Revo-i a assisté dans la réalisation de 15 cholécystectomies. Les interventions ont été menées à bien sans conversion à une approche ouverte ou laparoscopique. Le temps opératoire était de $115,3 \pm 17,31$ minutes et une perte sanguine estimée à $3,33 \pm 6,17$ ml.

Aucun événement indésirable intra ou postopératoire, y compris des perforations de la vésicule biliaire, n'a été rapporté. La durée moyenne d'hospitalisation était de 2 ± 1 jours et la plupart des patients ont exprimé leur satisfaction concernant les performances du Revo-i. [144]

La reconnaissance par le Maroc de l'importance des robots chirurgicaux s'inscrit dans une double dynamique : réduire l'écart avec l'Europe, grâce à sa proximité géographique, et consolider son statut de leader économique en Afrique. Le pays a déjà franchi une étape importante en installant deux robots chirurgicaux : un robot Revo-I à l'hôpital universitaire d'Agadir et un robot Toumai dans un hôpital privé à Casablanca.

En outre, le Maroc prévoit l'acquisition de huit autres robots destinés à équiper les établissements militaires, publics et privés. Ces équipements cibleront principalement les spécialités de la chirurgie viscérale, de l'urologie, de la gynécologie et de la chirurgie thoracique.[145]

2.2.2. Les Bras Robotiques Chirurgicaux :

Les interventions chirurgicales réalisées à l'aide de robots s'appuient sur des instruments fixés aux extrémités des bras robotisés, manipulés de manière indirecte par le chirurgien. Par conséquent, la conception et les performances de ces bras jouent un rôle déterminant dans la qualité des actes opératoires et constituent un aspect central des recherches sur les systèmes robotiques pour la chirurgie mini-invasive.

L'évolution de ces bras instrumentés a vu une progression allant des bras rigides limités aux bras articulés, jusqu'aux bras robotiques continus. [146]

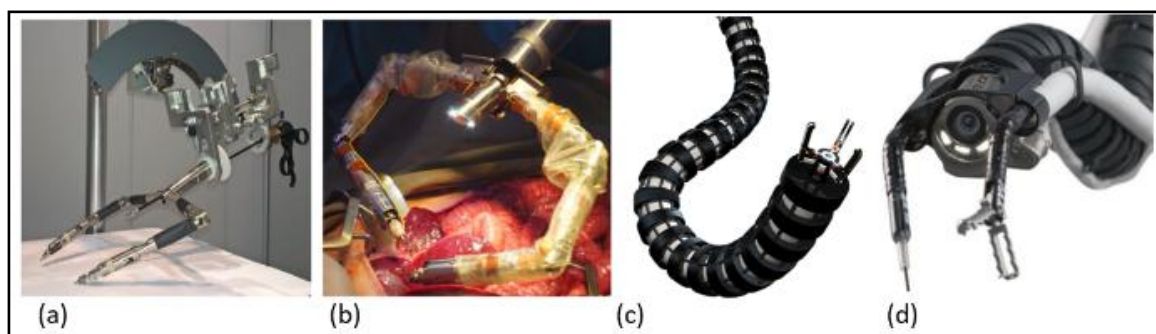


Figure 64. Exemples des bras articulés (a), (b) et des bras robotiques continus flexibles sans caméra (c) et avec caméra (d). [147-149]

Les bras robotiques ne se contentent pas d'assister les chirurgiens : ils redéfinissent leurs gestes, réduisant les marges d'erreur et offrant aux patients des résultats optimaux.

2.2.3. Autonomie des robots chirurgicaux :

La chirurgie robotisée autonome progresse à grands pas, enrichissant les systèmes robotiques existants de fonctionnalités toujours plus sophistiquées. Ces avancées repoussent les frontières de l'autonomie, transformant ces machines en véritables acteurs du bloc opératoire, capables d'exécuter des tâches complexes avec une précision et une efficacité accrues.

La classification de l'autonomie atteignable par un robot chirurgical se divise en six niveaux: absence d'autonomie, assistance robotique, autonomie partielle pour des tâches spécifiques, autonomie conditionnelle, autonomie élevée et autonomie complète.

- **Niveau 0 (Absence d'autonomie) :** Les mouvements du robot sont entièrement contrôlés par le chirurgien, sans assistance ni restrictions supplémentaires.

- **Niveau 1 (Le robot assistant) :** Les robots peuvent communiquer avec les chirurgiens pour les aider ou les guider dans l'exécution d'une tâche donnée. Cette assistance peut prendre la forme de guides virtuels pour améliorer la visibilité du site opératoire ou de limitations actives pour orienter les mouvements du chirurgien. Les technologies clés pour l'autonomie de niveau 1 incluent : La détection de l'interface tissu-robot, le suivi des instruments, le suivi oculaire du chirurgien.

- **Niveau 2 (Autonomie des tâches) :** Les robots peuvent effectuer des tâches chirurgicales spécifiques selon des directives fournies par le chirurgien. Pendant la durée de ces tâches, le contrôle passe de l'opérateur humain à la machine.

- **Niveau 3 (Autonomie conditionnelle) :** Les robots disposent de capacités perceptives leur permettant de planifier et d'exécuter des tâches, de comprendre l'environnement chirurgical et d'ajuster leur plan en cours d'une intervention.

- **Niveau 4 (Autonomie élevée)** : Le robot peut interpréter des données préopératoires et intraopératoires, élaborer un plan d'intervention, exécuter ce plan de manière autonome et le modifier selon les besoins. Dans ce paradigme, le chirurgien supervise le système.
- **Niveau 5 (Autonomie complète)** : Les robots atteignant ce niveau d'autonomie seraient capables d'effectuer une intervention chirurgicale complète sans assistance humaine.[150]

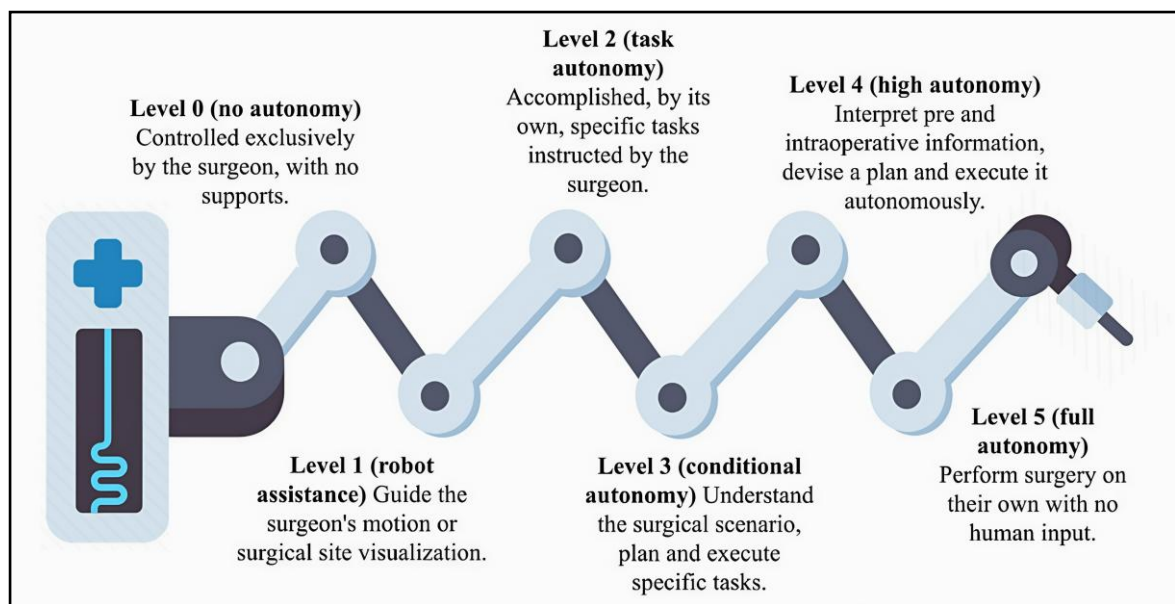


Figure 65. Niveaux d'autonomie des robots chirurgicaux. [150]

En résumé, la classification des niveaux d'autonomie des robots chirurgicaux incarne une révolution technologique, passant d'un rôle d'assistance humaine à une capacité d'exécution autonome de gestes complexes, notamment en chirurgie viscérale.

Cette évolution ouvre la voie à des interventions d'une précision inégalée, réduisant les risques opératoires et optimisant les temps de récupération. Ainsi, cette synergie entre robotique et intelligence artificielle redéfinit les standards de la chirurgie moderne, tout en posant les bases d'un avenir où technologie et chirurgie s'allient pour repousser les limites du possible.

2.2.4. L'intelligence Artificielle et Robots Chirurgicaux :

L'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond trouvent de nombreuses applications dans l'analyse et l'amélioration des systèmes robotiques avancés.

Un aspect clé dans la conception des robots chirurgicaux autonomes est leur capacité à reconnaître avec précision les détails chirurgicaux, tels que les repères anatomiques, les structures à risque et les étapes spécifiques des interventions. Cette aptitude est essentielle pour guider les instruments avec précision, prévenir les complications et assurer une exécution fluide et sécurisée des procédures chirurgicales.

De nombreuses études ont exploité l'apprentissage profond dans le domaine de la chirurgie laparoscopique et de la chirurgie assistée par robot, démontrant des avancées significatives dans ces domaines.

La synergie entre l'intelligence artificielle et l'imagerie peropératoire a trouvé des applications significatives dans le domaine de la chirurgie mini-invasive et assistée par robot.

Dans ces contextes, la précision et la constance offertes par les systèmes robotiques sont renforcées par les capacités de traitement d'images de l'IA, conduisant à une amélioration globale des performances chirurgicales.

La vision par ordinateur, associée à l'IA, permet aux systèmes robotiques d'interpréter les images peropératoires en temps réel, assurant une navigation précise, une identification tissulaire fiable et une exécution optimale des gestes chirurgicaux.

Cela contribue non seulement à la réduction du traumatisme chirurgical, mais également à l'accélération du processus de récupération, soulignant ainsi l'impact transformateur de l'IA sur les pratiques chirurgicales modernes.

Ces dernières années, de nombreux cas d'utilisation ont été rapportés, notamment en chirurgie viscérale, où la chirurgie laparoscopique constitue la majorité des interventions. Parmi celles-ci figurent la cholécystectomie laparoscopique, la colectomie et la sleeve gastrectomie.[151]

a. L'identification automatisée des phases chirurgicales :

L'un des objectifs majeurs de la recherche en intelligence artificielle au sein de domaine chirurgicale a été d'apprendre aux algorithmes à comprendre les événements opératoires.

Les interventions chirurgicales suivent des phases prédéfinies, et la reconnaissance précise de la phase en cours est fondamentale pour assurer une surveillance efficace du processus opératoire.

La reconnaissance des phases chirurgicales consiste à identifier automatiquement, à chaque instant t , la phase actuelle de l'intervention chirurgicale à partir des vidéos. Les chercheurs ont initialement formé des algorithmes pour réaliser cette tâche en se basant sur les technologies de vision par ordinateur.

En utilisant un ensemble de données constitué de 40 vidéos (dont 30 pour l'entraînement et 10 pour les tests), deux modèles d'apprentissage profond ont été développés pour automatiser l'identification des étapes chirurgicales lors des hépatectomies.

Le Modèle 1 a obtenu une précision globale de 89,1 %, qui a été améliorée à 94,7 % avec le Modèle 2. Cette identification, réalisée en temps réel, atteignait une vitesse de traitement de 21 images par seconde, illustrant les performances accrues du système. [152]

Une autre étude s'est intéressée à l'application de l'intelligence artificielle dans l'analyse des phases de la cholécystectomie.

Pour ce faire, 163 vidéos collectées dans plusieurs centres hospitaliers ont été utilisées après une annotation minutieuse par des chirurgiens experts.

En comparant les résultats du modèle d'apprentissage profond avec les annotations humaines, le système a démontré une précision notable de 91,05 %, confirmant son efficacité pour analyser et identifier les étapes opératoires de manière automatisée. [153]

Dans un domaine connexe, un modèle basé sur des réseaux neuronaux convolutifs (CNN) a été conçu pour reconnaître automatiquement les différentes phases chirurgicales dans les vidéos de sigmoïdectomie laparoscopique.

Les données, issues de 71 interventions, ont été transformées en images fixes et chaque vidéo a ensuite été segmentée manuellement en 11 phases distinctes, et chaque image a été annotée selon les actions chirurgicales correspondantes. Après l'entraînement, le modèle a été testé sur un ensemble de données inédites, atteignant une précision de 91,9 % avec une capacité de traitement de 32 images par seconde. [154]

b. L'identification automatisée des instruments chirurgicales :

La détection des instruments chirurgicaux présente des défis importants, notamment leur similitude, leur occultation par le sang ou les tissus, ainsi que les variations importantes de leur taille sur les images dues aux effets de perspective. Les approches d'apprentissage profond se sont révélées particulièrement efficaces pour reconnaître et localiser les instruments chirurgicaux.[155]

Dans cette perspective, LapToolNet, un modèle innovant d'intelligence artificielle, a été créé pour repérer avec précision une gamme d'instruments chirurgicaux tels que la pince bipolaire, l'agrafeuse, la pince à préhension, le crochet, l'irrigateur, les ciseaux et le sac à prélèvements dans les images extraites de vidéos laparoscopiques. Ce système a atteint des niveaux impressionnants de concordance, surpassant ou égalant 80 % de précision dans ses détections. [156]

Un système similaire de détection des instruments chirurgicaux pour les enregistrements vidéo de gastrectomies laparoscopiques été développé. Un total de 10716 images extraites de 52 vidéos de gastrectomies laparoscopiques a été inclus dans les ensembles de données d'entraînement et de validation. Après l'entraînement, la précision et la sensibilité sur l'ensemble de test étaient respectivement de 87% et 83%. [157]

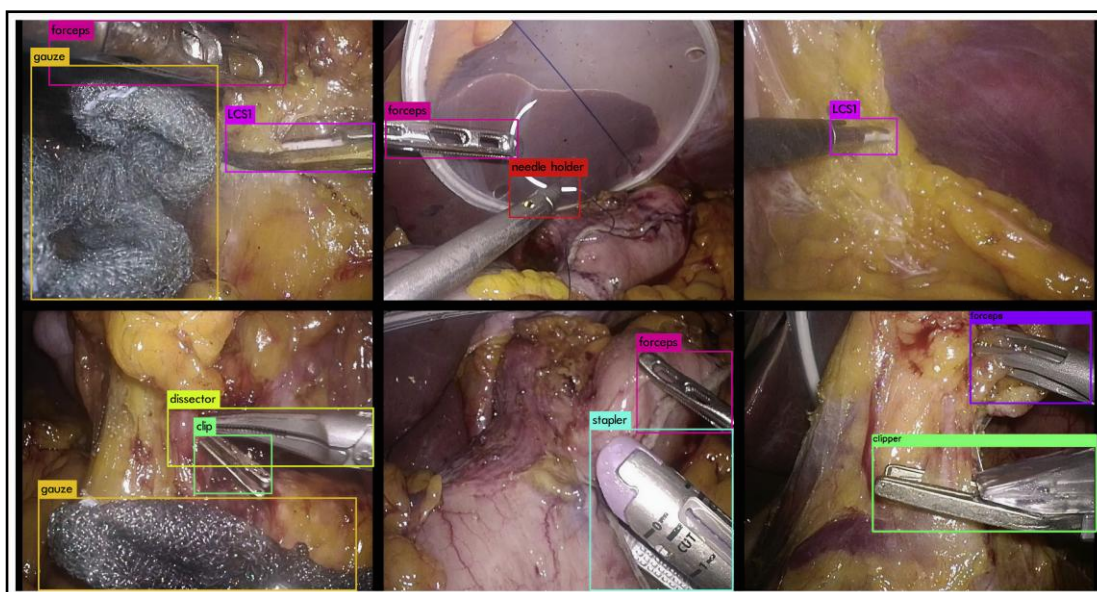


Figure 66. Illustrations des résultats du système de détection des instruments chirurgicaux.

Le système a réussi à détecter les instruments chirurgicaux dans diverses scènes. Tels que les ciseaux coagulateurs laparoscopiques. [157]

c. L'identification automatisée des structures anatomiques :

▪ Détection des régions anatomiques :

La détection et la mise en évidence des régions anatomiques pendant une intervention chirurgicale peuvent fournir une assistance précieuse et prévenir les dommages accidentels aux structures critiques, telles que les vaisseaux et les nerfs.

Bien que la recherche sur la représentation de l'anatomie critique se concentre principalement sur l'enregistrement et l'affichage des données issues des examens préopératoires, des approches plus récentes visent à détecter directement ces structures à partir des images et vidéos intra-opératoires. [158]

Dans ce cadre une étude visait à développer un modèle de segmentation basé sur l'apprentissage profond pour l'identification en temps réel des structures biliaires, aidant les chirurgiens à déterminer le site optimal de section pendant le geste chirurgical.

Les performances du modèle ont été évaluées révèlent que le modèle a prédit les structures biliaires avec une sensibilité de $72,8 \% \pm 1 \%$ et une spécificité de 85% pour le canal biliaire, tandis que la paroi antérieure a obtenu une sensibilité de $42,9 \% \pm 6 \%$ et une spécificité de 75% , avec une vitesse d'inférence de 15,3 images par seconde, montrant la faisabilité de la reconnaissance anatomique en temps réel. [159]

Ces résultats soulignent le potentiel des modèles de segmentation basés sur l'apprentissage profond pour améliorer la précision chirurgicale en identifiant les structures critiques.

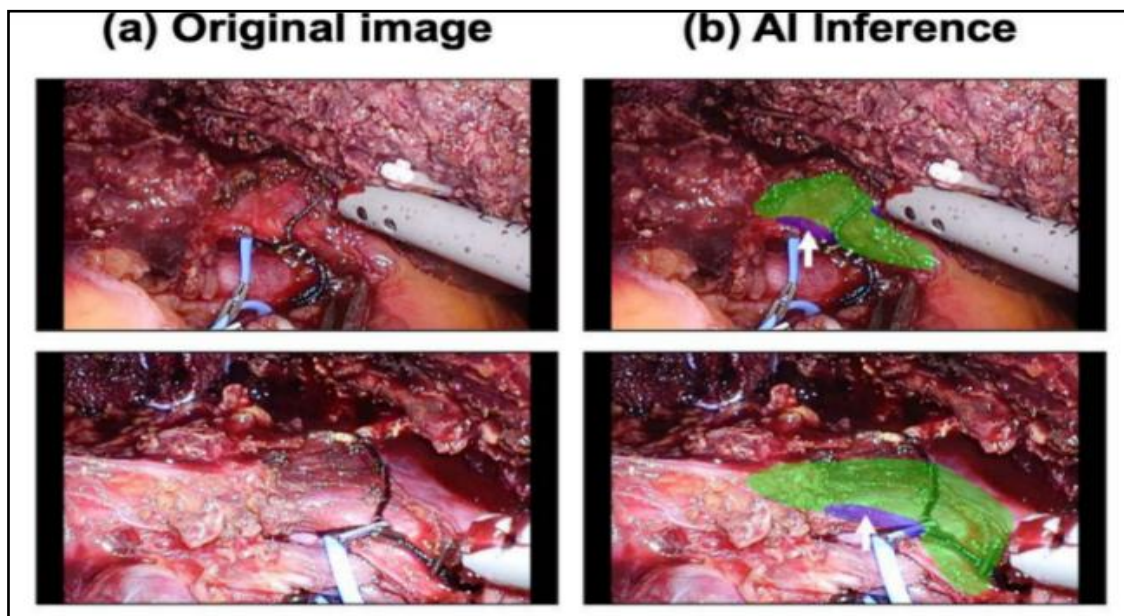


Figure 67. (a) images laparoscopique et (b) les résultats obtenue par le modele intelligent avec détection de canal biliaire en vert et la paroi antérieure en violet. [159]

▪ **Détection des nerfs :**

La préservation des nerfs autonomes, cruciale pour maintenir la fonction génito-urinaire, constitue un défi en chirurgie colorectale, car leur identification repose sur l'expérience et la précision du chirurgien. [160]

Une étude récente a exploré le développement et la validation d'un modèle d'apprentissage profond pour segmenter ces nerfs, notamment les nerfs hypogastriques et le plexus hypogastrique supérieur, au cours de chirurgies colorectales laparoscopiques.

Les données utilisées provenaient de vidéos chirurgicales annotées manuellement sous la supervision d'un expert chirurgical. Le modèle a été testé en temps réel durant les interventions pour comparer sa rapidité et son efficacité à celles des chirurgiens.

De plus, un examen pathologique a confirmé que les structures identifiées par le modèle correspondaient bien à des tissus nerveux, validant ainsi son utilité pour une reconnaissance précise en peropératoire. [160]

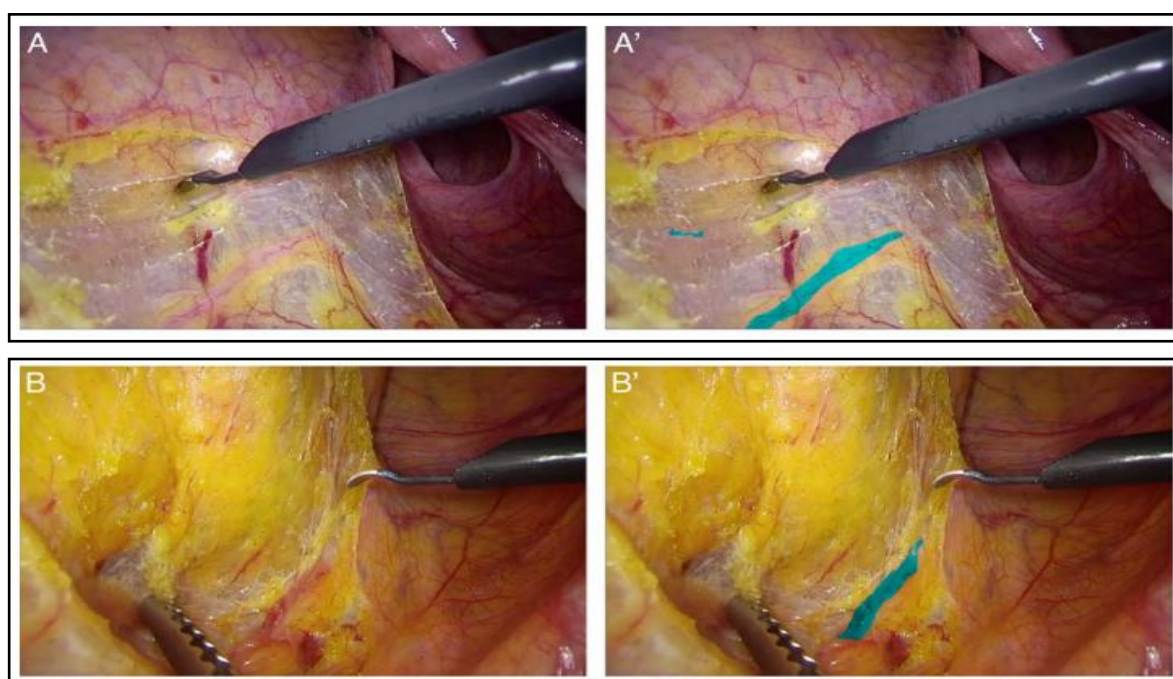


Figure 68. (A), (B) : images originales et (A'), (B') : les résultats de prédiction du modèle en

bleu.[160]

Lors de 12 chirurgies, le modèle a surpassé les chirurgiens en rapidité pour identifier les structures nerveuses dans plusieurs cas : il a détecté le nerf hypogastrique droit plus rapidement dans 50 % des interventions, le nerf hypogastrique gauche dans 41,7 % des cas et le plexus hypogastrique supérieur dans 50 % des cas.

L'examen pathologique a validé ces résultats, confirmant que les 11 échantillons identifiés correspondaient bien à des tissus nerveux. Ce modèle pourrait faciliter la reconnaissance intra-opératoire des nerfs lors des chirurgies colorectales laparoscopiques. [160]

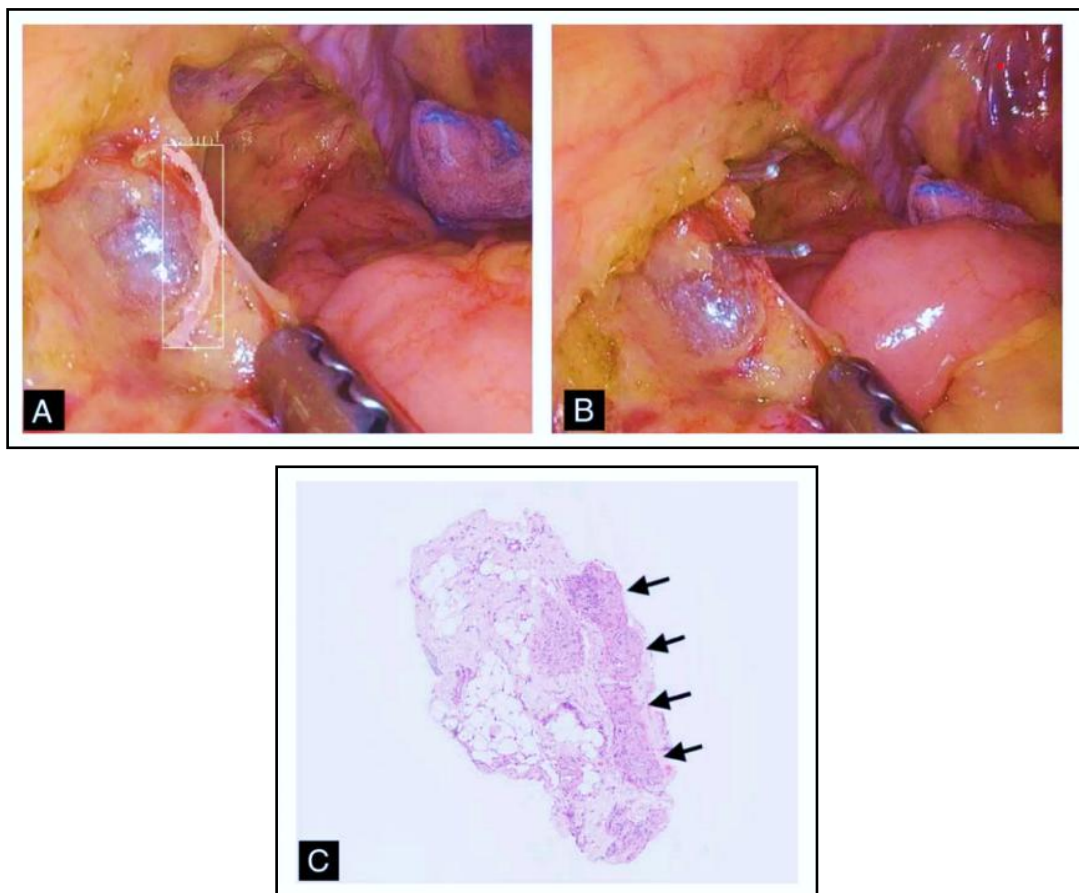


Figure 69. Marquages intra-opératoires des branches nerveuses autonomes colorectales étiquetées par le modèle d'apprentissage profond, et les résultats pathologiques : (A) image prédite, (B) marquage de la branche colorectale avec un clip chirurgical, et (C) tissu nerveux (flèche noire) dans l'examen pathologique. [160]

▪ **Détection des surfaces d'incision sûre :**

En chirurgie viscérale, la réalisation d'une incision dans une zone sécurisée est une étape fondamentale qui peut grandement influencer le succès de l'intervention. Cependant, cette tâche est souvent complexe et nécessite des compétences chirurgicales avancées. En raison de la difficulté à identifier avec précision les structures anatomiques tout en minimisant les risques.

Dans ce contexte, un modèle d'apprentissage profond a été conçu pour automatiser la segmentation des fibres de tissu conjonctif lâche (LCTFs), qui représentent des repères fiables pour délimiter un plan de dissection sûr. Pour entraîner ce modèle, des annotations précises ont été réalisées à partir d'images extraites de vidéos de gastrectomies assistées par robot.

Afin de mesurer l'efficacité du modèle, une évaluation a été réalisée avec la participation de 20 chirurgiens. Ces derniers ont été invités à répondre à deux questions principales : premièrement, quelle était la sensibilité du modèle à la reconnaissance des LCTFs, sur une échelle de 5 points, et deuxièmement, combien d'images avaient été mal interprétées par le système.[161]

Les résultats ont montré une moyenne de 3,52 pour la sensibilité du modèle, indiquant que celui-ci parvient à identifier de manière relativement précise les LCTFs dans les images. De plus, le taux d'erreurs de détection était de 0,14, ce qui suggère que le modèle commet très peu d'erreurs dans l'interprétation des images. [161]

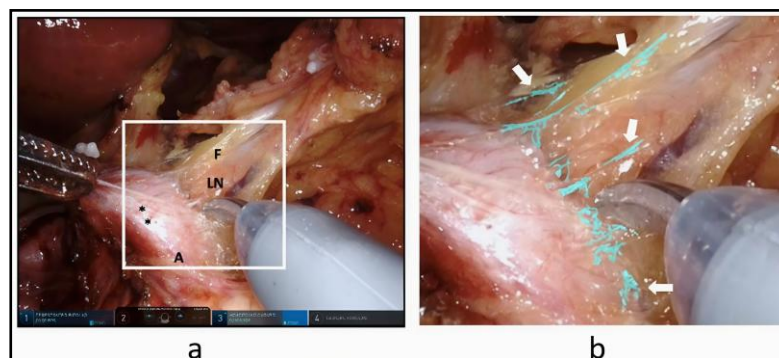


Figure 70. Résultats de la segmentation par le modèle intelligent (a) Image originale avec A : artère hépatique commune, F : tissu adipeux, LN : ganglion lymphatique ; * : nerfs. (b) Prédiction par le modèle en bleu cyan. [161]

Lors des interventions de cholécystectomie laparoscopique, une étude récente a explorée cette application, mettant en lumière la capacité des modèles d'intelligence artificielle à identifier en temps réel l'anatomie chirurgicale.

En se basant sur des procédures de cholécystectomie laparoscopique, ils ont développé des modèles capables de distinguer les zones sûres et non sûres de dissection, tout en reconnaissant les repères anatomiques pendant l'intervention. Ces modèles ont été entraînés à partir de 2627 images aléatoires extraites de 290 vidéos laparoscopiques. Les performances des modèles étaient particulièrement élevées, avec des taux de précision de 94 % pour l'identification des zones sûres et de 95 % pour les zones non sûres. [162]

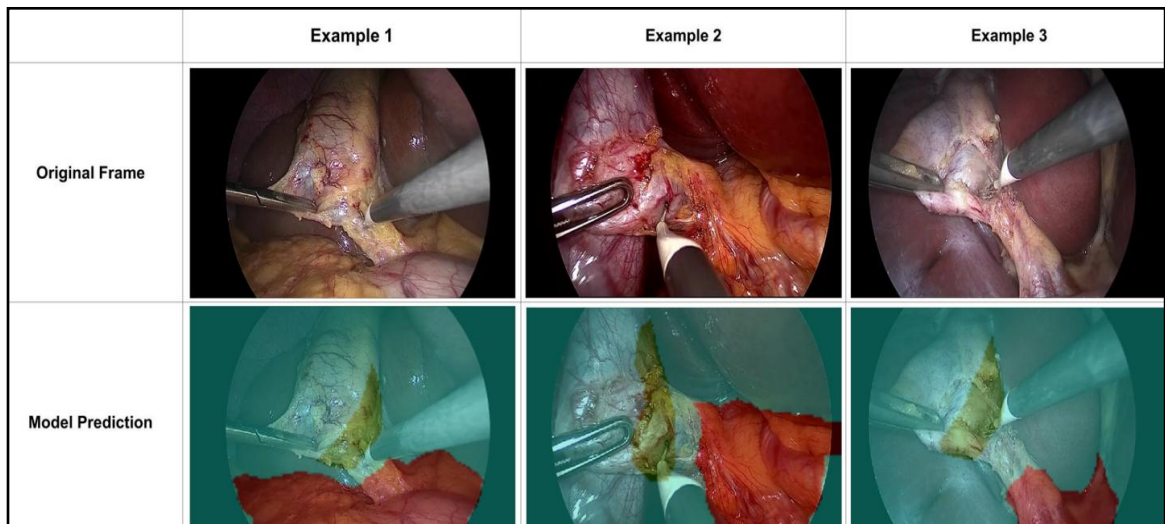


Figure 71. Trois exemples distincts de prédictions du modèle, comparées aux images d'origine, sont présentés sous forme de superpositions : les zones "Go" sont représentées par une superposition verte, tandis que les zones "No-Go" sont représentées par une superposition rouge.[162]

En automatisant des tâches aussi cruciales que l'identification des zones sûres pour l'incision, cette technologie ne se limite pas à améliorer la précision des interventions chirurgicales, mais ouvre également la voie à une automatisation complète des robots chirurgicaux.

d. L'automatisation progressive :

Pour atteindre une automatisation complète des robots chirurgicaux, de nombreuses recherches explorent l'utilisation de l'intelligence artificielle afin de réduire la charge de travail physique et mentale des chirurgiens. L'objectif est d'automatiser des tâches chirurgicales spécifiques, telles que la suture, la dissection ou le guidage du camera, tout en garantissant précision et sécurité.

Ces avancées visent à optimiser les interventions, à minimiser les erreurs humaines et à permettre aux chirurgiens de se concentrer sur des aspects plus complexes de l'opération.

▪ La sensation tactile :

Comparée à la laparoscopie, la chirurgie minimalement invasive assistée par robot souffre de l'absence de retour de force, un élément crucial pour éviter la rupture des sutures. Pour pallier cette lacune, les chirurgiens déduisent la force exercée sur la suture à partir de leur proprioception et des images 2D, en les comparant à leur expérience acquise durant leur formation.

Dans cette optique, une méthode basée sur l'apprentissage profond a été proposée, qui utilise une seule image et la position du robot pour estimer la force de traction des sutures, sans nécessiter de capteur de force. L'architecture du réseau neuronal, associée aux réseaux de mémoire à long terme et à court terme (LSTM), est utilisée pour estimer cette force de traction. La faisabilité du réseau proposé a été vérifiée, avec des résultats satisfaisants. Les modèles d'apprentissage ont réussi à estimer la force de traction. [163]

Un nouvel algorithme similaire utilisant des réseaux de neurones a été développé en utilisant le courant des moteurs de l'instrument chirurgical et des réseaux de neurones pour estimer cette interaction de force. Des tests ont été réalisés pour évaluer la faisabilité de l'algorithme développé. Les résultats ont montré que l'algorithme peut estimer la force d'interaction outil-tissu lors de la préhension et présente un potentiel d'utilisation en temps réel. Cette méthode a permis de prédire à la fois des forces importantes et relativement faibles. [164]

- **Le guidage automatisée du caméra :**

En chirurgie robotique, le guidage de la caméra est d'une importance capitale pour les résultats cliniques et la prévention des complications, car la qualité des images et la motion de la caméra déterminent la vue du champ opératoire. Cependant, dans la pratique chirurgicale standard, le guidage de la caméra est généralement effectué par un assistant. Afin de surmonter les limites du guidage manuel ou du télémanipulation, un système robotique autonome de guidage de la caméra basé sur des algorithmes d'apprentissage automatique a été construit.

Ce robot est considéré comme le premier robot autonome de guidage de caméra, doté de capacités d'auto-apprentissage et sensible au contexte, spécifiquement conçu pour la chirurgie mini-invasive. L'entraînement de ce système a été réalisé à partir des résultats de 20 interventions chirurgicales effectuées avec un guidage manuel de la caméra par un seul chirurgien.

Après une évaluation de ses performances, le robot a démontré des résultats prometteurs. Grâce à l'expérience accumulée, la durée moyenne des interventions a été réduite, passant de 1704 ± 244 secondes à 1197 secondes. De plus, la qualité du guidage de la caméra a connu une amélioration significative, augmentant de 38,6 % à 56,2 %. [165]



Figure 72. Guidage automatisée du caméra par un robot intelligent. [165]

En conclusion, ce robot de guidage de caméra a prouvé sa capacité à améliorer ses performances avec l'expérience, posant ainsi les bases d'une nouvelle génération de robots chirurgicaux capables de s'adapter de manière autonome aux besoins spécifiques des chirurgiens.

▪ **Aspiration automatique :**

La tâche d'hémostase couvre un éventail de sources de saignement et varie en fonction de la vitesse, de la trajectoire et du volume du sang. Dans les cas extrêmes, un vaisseau sanguin non contrôlé remplit le champ opératoire de sang en écoulement. La première solution automatisée pour l'hémostase, développée grâce à un nouvel algorithme probabiliste de détection du flux sanguin et une technique de génération de trajectoire qui guide les outils d'aspiration autonomes vers le sang accumulé. [166]

L'algorithme de détection du flux sanguin a été testé à la fois dans des scènes simulées et dans un scénario réel de traumatisme impliquant une hémorragie. Les résultats montrent que l'algorithme proposé est une solution automatisée qui permet une détection précise, un temps de réaction rapide et une élimination efficace du sang en écoulement. [166]

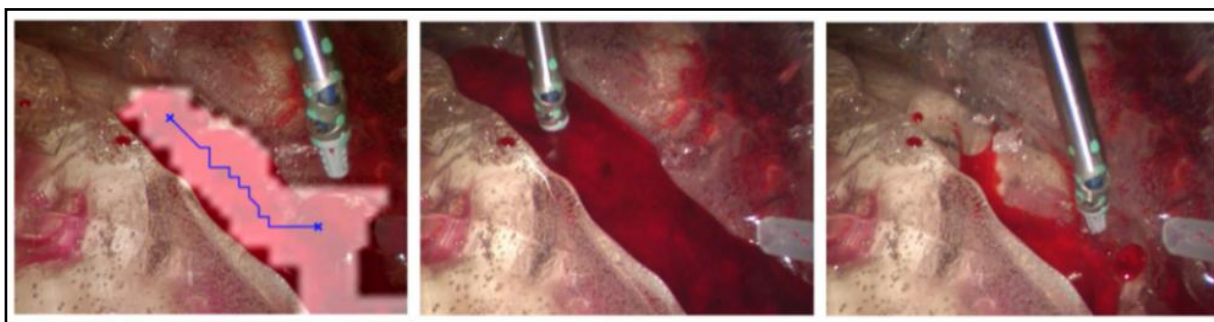


Figure 73. Aspiration autonome du sang pour les cas de traumatisme en chirurgie avec l'outil d'aspiration robotisé qui débarrasse le champ opératoire du sang en écoulement. [166]

Cette solution automatisée d'hémostase, intégrant un algorithme avancé de détection du flux sanguin et un système d'aspiration autonome, se positionne comme un outil prometteur dans le domaine de la chirurgie viscérale et des interventions robotiques complexes.

Les études préliminaires soulignent son efficacité dans la gestion des saignements actifs, y compris dans des contextes critiques, améliorant ainsi la visibilité du champ opératoire et réduisant les risques per- et postopératoires pour le patient.

▪ **Les Sutures Autonomes :**

L'automatisation de la suture en chirurgie robotique joue un rôle clé dans l'amélioration de la précision et de la sécurité.

Une étude a présenté des avancées majeures dans les systèmes de suture robotique autonome, en mettant l'accent sur deux défis majeurs : l'analyse des forces aiguille-tissu via un modèle d'éléments finis et la détection en temps réel des plaies avec des réseaux de neurones convolutifs.

Trois modèles CNN ont été testés pour la détection des plaies. Le modèle DeepLabV3+ à montrer la meilleure performance avec une précision de 89,9 %. Le système a été testé avec succès sur un robot équipé d'une pince, il a réalisé une suture autonome, marquant une avancée importante vers des systèmes robotisés de suture totalement autonomes. [167]



Figure 74. Détection de la plaie par le model intelligent : DeepLabV3+. [167]

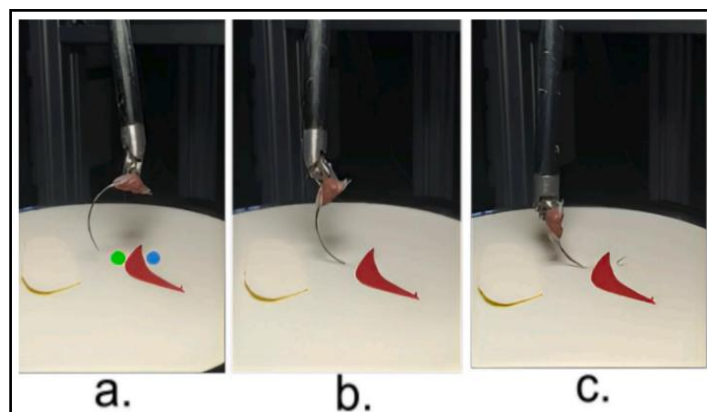


Figure 75. La trajectoire de pénétration d'aiguille par le robot avec : (a) Position initiale de l'aiguille, (b) Pénétration dans le tissu et (c) Sortie du tissu. [167]

e. Automatisation complète :

▪ **Le Robot Autonome pour les Tissus Mous (STAR) :**

L'anastomose autonome représente une tâche chirurgicale complexe, particulièrement dans le contexte des tissus mous, en raison de la nécessité d'intégrer des techniques d'imagerie sophistiquées, un suivi précis des tissus, une planification chirurgicale détaillée et une exécution minutieuse via des stratégies de contrôle hautement adaptables. Ces défis sont accentués dans le cadre laparoscopique, où les contraintes de mouvement et de vision imposent des exigences accrues en termes de manœuvrabilité et de répétabilité.

Le robot STAR (Smart Tissue Autonomous Robot), contrôlé par des algorithmes d'intelligence artificielle et équipé d'un ensemble de capteurs visuels et haptiques, offre une solution innovante à ces défis.

Il permet aux chirurgiens de sélectionner parmi des plans chirurgicaux générés de manière autonome, tout en exécutant une gamme étendue de tâches de façon indépendante. Ce système a été spécifiquement testé pour la réalisation d'anastomoses intestinales laparoscopiques autonomes, démontrant des résultats significatifs en termes de qualité chirurgicale.

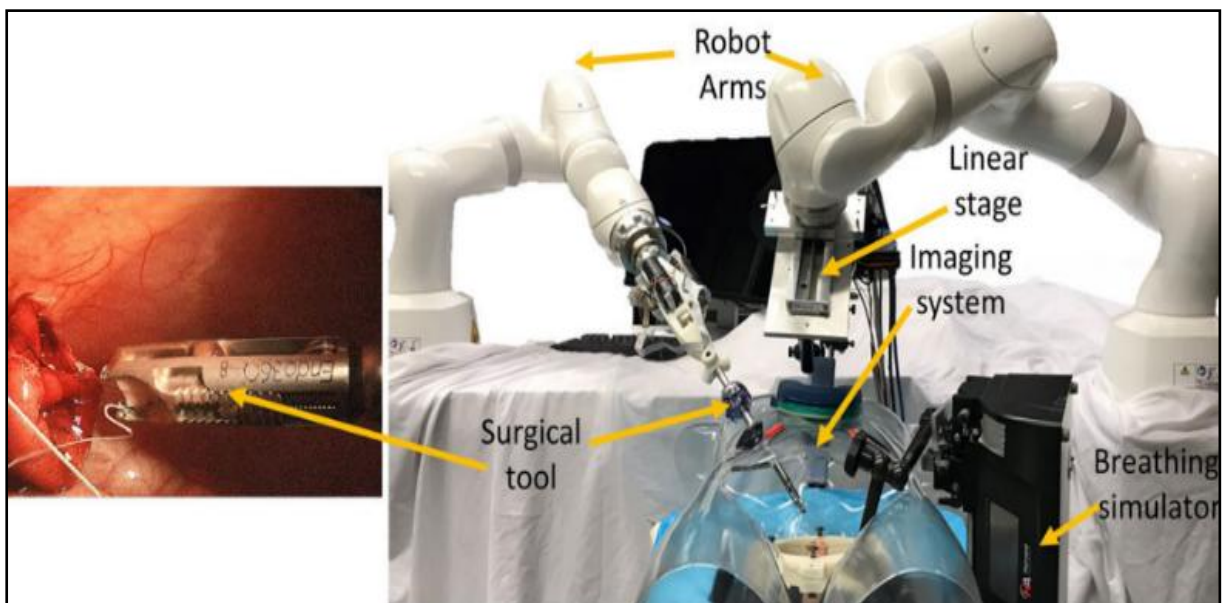


Figure 76. Le Robot Autonome pour les Tissus Mous (STAR). [168]

Les critères d'évaluation, tels que la précision du placement de l'aiguille, l'espacement des sutures, la taille des points, le temps opératoire, la perméabilité du lumen et la pression de fuite, ont été comparés entre le système autonome STAR et la chirurgie laparoscopique manuelle.

Les résultats ont révélé une nette supériorité du robot autonome, avec moins d'erreurs commises et une meilleure fluidité de l'écoulement des liquides visqueux à travers l'intestin reconstruit. Ces performances ont été confirmées à la fois sur des modèles de tissus intestinaux simulés et vivants, soulignant l'efficacité et la fiabilité du système STAR dans des conditions réalistes.

Ces avancées positionnent le robot STAR comme une technologie prometteuse pour améliorer la précision, la sécurité et l'efficacité des anastomoses intestinales, ouvrant la voie à des applications cliniques élargies et à une intégration plus poussée de l'autonomie en chirurgie des tissus mous. [168]

Les robots entièrement autonomes en chirurgie viscérale sont encore à un stade expérimental, mais les progrès dans les domaines de l'intelligence artificielle, de la vision par ordinateur et de la robotique laissent envisager une capacité de contrôle plus autonome dans un avenir proche.

En conclusion, l'intégration de l'IA, du ML et du DL en robotique avancée transforme le domaine chirurgical en permettant l'automatisation des tâches répétitives, l'amélioration de la précision et l'adaptabilité des robots à divers environnements.

Ces technologies optimisent la prise de décision, accroissent l'efficacité et renforcent la sécurité en prenant en charge des tâches dangereuses. Elles contribuent également à la réduction des coûts liés à la main-d'œuvre et à l'entretien, tout en générant des gains significatifs en performance et productivité, révolutionnant ainsi le secteur de la robotique. [169]

2.3. Le Guidage en Temps Réel :

La réalité augmentée et la réalité mixte constituent un outil de navigation avancé qui permet de visualiser les structures cibles et les variations anatomiques en superposant des modèles virtuels transparents des organes.

Ce processus, appelé « enregistrement », consiste à superposer de manière précise le modèle 3D virtuel basé sur l'imagerie pré opératoire du patient à l'anatomie réelle du patient pendant l'intervention. Un enregistrement exact est crucial pour fournir des informations précises et utiles au chirurgien. Toutefois, cette étape reste complexe et fait l'objet de recherches continues.

La réalité augmentée, la réalité mixte et la chirurgie assistée par l'image ont été d'abord appliquées à la neurochirurgie et à la chirurgie maxillo-faciale, où les structures rigides comme les os rendent le modèle virtuel très congruent avec l'anatomie réelle.

En revanche, en chirurgie viscérale, en particulier lors d'approches laparoscopiques, la réalité augmentée rencontre plusieurs défis en raison des mouvements respiratoires et de la déformation des tissus mous pendant les manipulations chirurgicales. [170]

a. Les Casques du Réalité Augmentée / Réalité Mixte :

Les casques de réalité augmentée et réalité mixte, tels que le HoloLens de Microsoft, ont le potentiel de simplifier la visualisation intra opératoire des interventions viscérales complexes, notamment en présentant de manière plastique les informations tridimensionnelles directement dans ou au-dessus du site chirurgical.

De plus, la possibilité de communication audio et vidéo via un service en ligne permet des consultations à distance avec un expert extérieur.

L'affichage holographique proposé par le HoloLens démontre une stabilité remarquable, offrant aux chirurgiens un accès instantané et intuitif aux informations anatomiques critiques sans qu'ils aient à détourner leur regard du site opératoire. Cette technologie permet de superposer des modèles 3D précis directement sur le champ chirurgical, améliorant ainsi la visualisation des structures complexes et facilitant la planification en temps réel. [5]

L'interface utilisateur repose sur deux gestes principaux : le geste "bloom" pour ouvrir des fenêtres et l'"air-tap" pour effectuer un clic, similaire à l'utilisation d'une souris permettent de manipuler, maintenir et naviguer dans l'interface, tout en maintenant un environnement stérile et sans quitter le site chirurgical.

En outre, le HoloLens permet de réaliser des conférences vidéo en temps réel. Le chirurgien, équipé du dispositif, peut transmettre sa vue au consultant distant via un réseau Wi-Fi stable dans la salle d'opération.

Le consultant peut ainsi voir et entendre ce que le chirurgien observe et interagir en temps réel en ajoutant des annotations telles que des points, des lignes ou des flèches sur le site chirurgical à l'aide d'un stylet sur une tablette.

Ces marques demeurent dans le champ opératoire jusqu'à ce qu'elles soient effacées ou que la téléconférence soit terminée, soit par une commande gestuelle, soit vocale. [5]

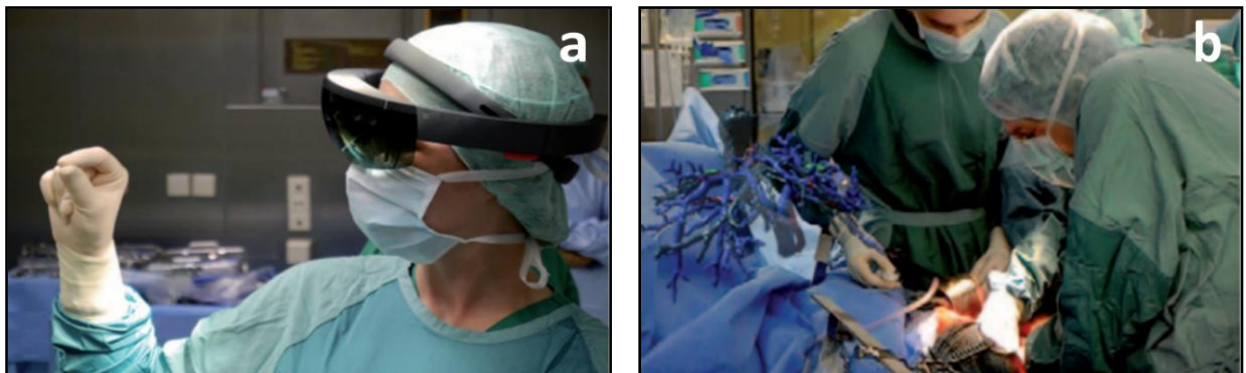


Figure 77. Dispositif HoloLens en salle d'opération : (a) Le chirurgien, tout en étant stérile, porte et utilise le dispositif à l'aide des gestes, (b) visualisation d'un modèle des structures hépatiques reconstruites en 3D superposé sur le champ opératoire. [171]

b. Les Techniques du Marquage :

Afin d'améliorer la planification et la réalisation des interventions, une approche innovante a été développée, reposant sur l'utilisation de la réalité augmentée et mixte. Cette méthode a été appliquée à des patients atteints de cancer à localisation abdominale, avec l'aide d'une équipe multidisciplinaire composée de chirurgiens, radiologues, ingénieurs et autres experts.

Ensemble, ils ont conçu des modèles tridimensionnels personnalisés pour chaque patient, basés sur des examens préopératoires, permettant une visualisation plus précise pendant l'opération.

Ces chercheurs ont également développé une méthode non invasive de marquage et de visualisation des modèles anatomiques en réalité augmentée, afin de surmonter les limitations des méthodes invasives traditionnelles.

Ces méthodes traditionnelles de marquage reposent généralement sur des techniques invasives, telles que l'insertion de fils métalliques ou de clips. Ces méthodes impliquent souvent des procédures supplémentaires pour localiser et fixer les repères, ce qui peut augmenter le risque d'infection et de complications. [172]



Figure 78. Les méthodes traditionnelles de marquage. [172]

Au contraire, le nouveau système innovant utilise des aimants en néodyme fixés à la peau, servant de points d'ancrage pour les marqueurs et les repères nécessaires à la création du modèle 3D. Les aimants sont fixés à la peau à l'aide d'une surface adhésive et peuvent être utilisés pour aligner le modèle avec la réalité anatomique du patient pendant l'intervention.

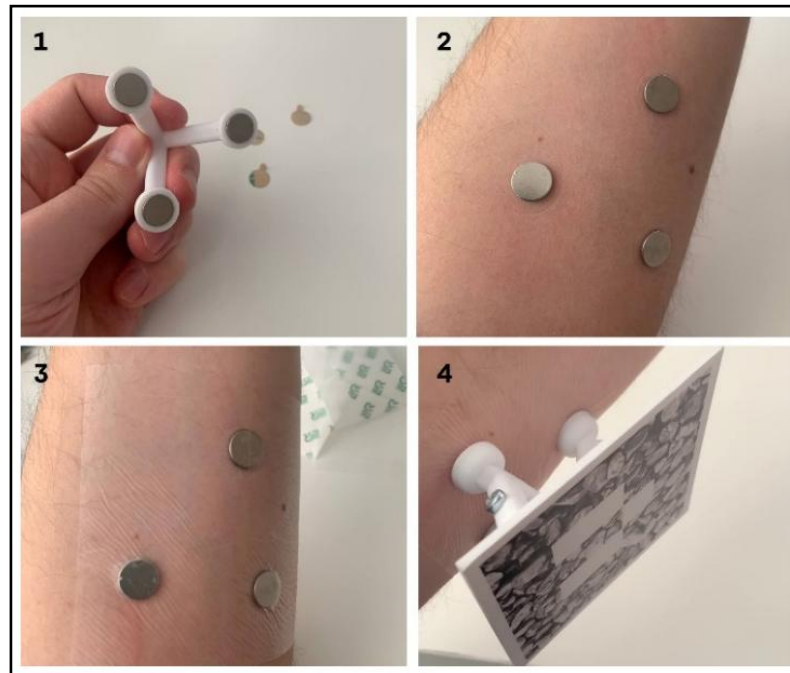


Figure 79. Etapes d'insertion de système du marquage avec 1 : les aimants sont placés sur les douilles du cadre guide. La couverture protectrice de la couche adhésive de chaque aimant est retirée. 2 : les aimants sont installés sur la peau à l'aide du cadre guide. 3 : les aimants sont recouverts d'un film protecteur et le patient est prêt pour la tomodensitométrie (CT). 4 : le marqueur stérile est fixé sur ces aimants pour la réalité augmentée pendant l'intervention chirurgicale. [172]

Une fois les aimants installés, le patient passe une tomodensitométrie (TDM), où les aimants sont utilisés pour relier le modèle 3D aux repères.

Ces données sont ensuite transférées aux lunettes de réalité augmentée, où le modèle est aligné avec la position physique des repères du marqueur, garantissant une visualisation précise pendant l'opération.

Bien que cette méthode soit non invasive et flexible, elle présente un défi en termes de précision, en raison de la fixation des marqueurs sur la peau, une surface mobile.

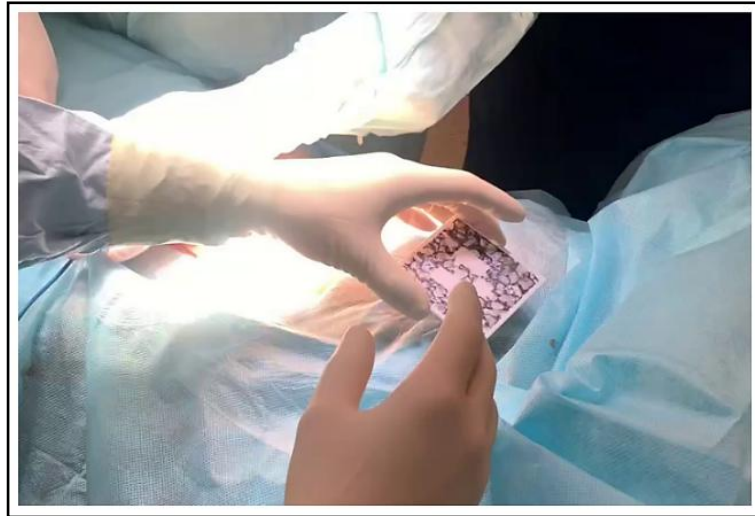


Figure 80. Moment de l'installation du marqueur intra opératoire dans des conditions stériles.[172]

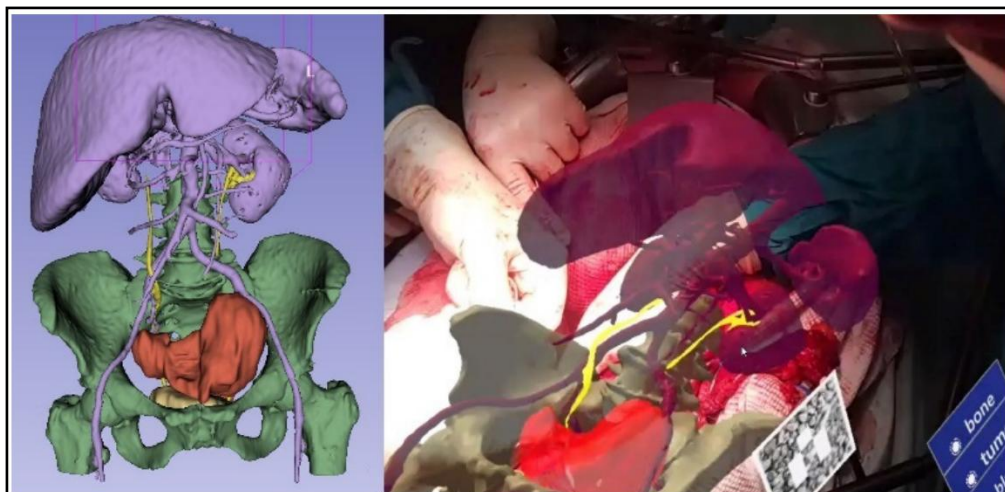


Figure 81. Modèle 3D de la reconstruction de l'anatomie du patient et de son superposition pendant l'opération chez un patient atteint d'un cancer de l'ampoule inférieure du rectum. [172]

En conclusion, ces marqueurs magnétiques jouent un rôle clé dans l'amélioration de l'exécution des interventions chirurgicales assistées par réalité augmentée, tout en minimisant les risques liés aux techniques invasives.

Ces technologies prometteuses de visualisation en 3D, désarmées appliquées à des procédures comme la pancréatectomie et la splénectomie, permettent d'optimiser les résultats en guidant les chirurgiens grâce à des visualisations en temps réel des structures anatomiques.

a. La pancréatectomie :

La chirurgie pancréatique est une procédure complexe, comportant des risques élevés de complications en raison de l'anatomie délicate et de la proximité des grandes structures vasculaires.

Le système ARAS (Augmented Reality Assistance System) a été développé pour améliorer la chirurgie pancréatique en utilisant la réalité augmentée afin de fournir une assistance visuelle en temps réel. Ce système repose sur des modèles 3D des structures anatomiques du patient, créés à partir des images de TDM récents, permettant une planification et une exécution chirurgicale plus précises. ARAS utilise des marqueurs visuels pour superposer les modèles 3D aux structures réelles pendant l'opération, assurant une grande précision dans l'alignement des données virtuelles et physiques. [173]

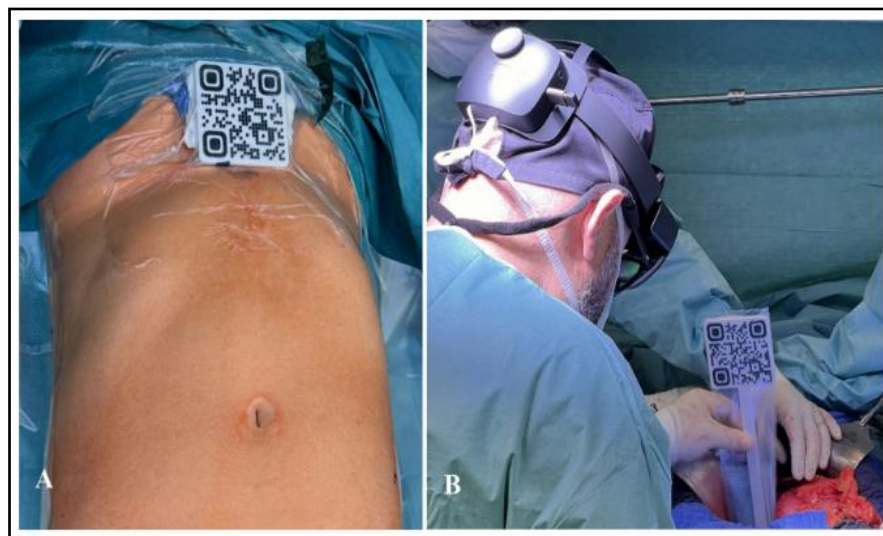


Figure 82. La préparation du champ chirurgical avec : (A) fixation de marqueur stérile sur le processus xiphoïde avant l'intervention et (B) La mise de marqueur comme point d'enregistrement.[173]

Le système a été testé sur deux patientes âgées de 82 et 73 ans, présentant des tumeurs pancréatiques malignes. Pour la première patiente, la planification préopératoire initiale prévoyait une pancréatectomie distale préservant la rate.

Cependant, grâce à ARAS, une anomalie vasculaire a été identifiée, rendant la préservation de la rate impossible, et la décision a été prise de réaliser une pancréatectomie distale avec splénectomie. La seconde patiente a subi une pancréatectomie distale avec splénectomie étendue, guidée par ARAS.

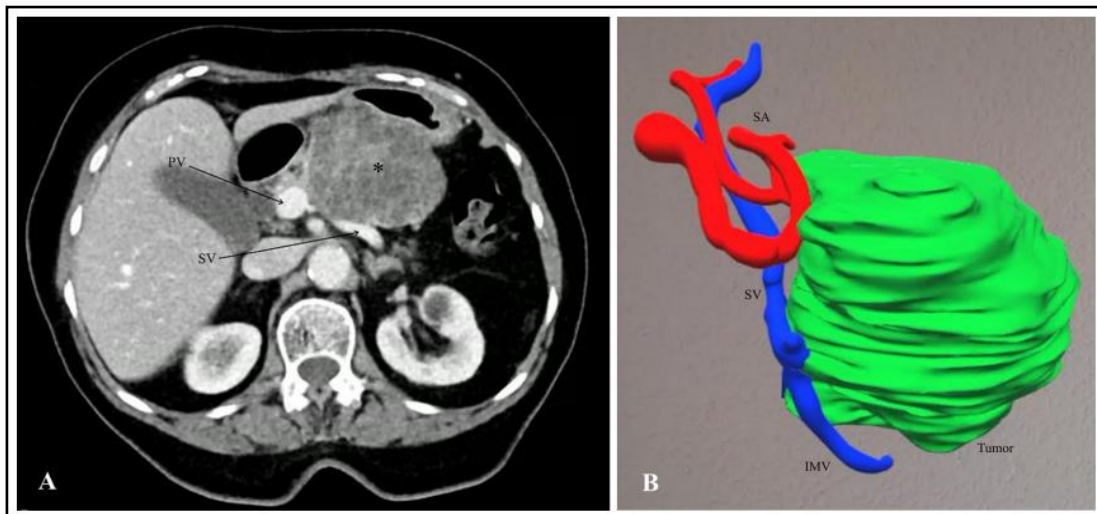


Figure 83. Planification préopératoire de la procédure à l'aide des images de tomodensitométrie : (A) et d'un modèle 3D (B), illustrant le trajet tortueux de l'artère splénique (SA), la proximité de la tumeur (*) la veine splénique (SV), veine porte (PV), et la veine mésentérique inférieure (IMV). [173]

Les résultats ont montré une perte sanguine minimale (50 mL), et les durées des interventions étaient de 125 et 140 minutes respectivement. Après la chirurgie, les deux patientes ont eu une récupération rapide et ont été libérées sans complications sept jours plus tard.

Ces résultats montrent l'efficacité du système ARAS pour améliorer la précision chirurgicale et les résultats des patients, tout en facilitant la planification et l'exécution des procédures complexes. Ce système de navigation laparoscopique en réalité augmentée s'est révélé comme un outil innovant pour la réalisation des chirurgies pancréatiques laparoscopiques. [173]

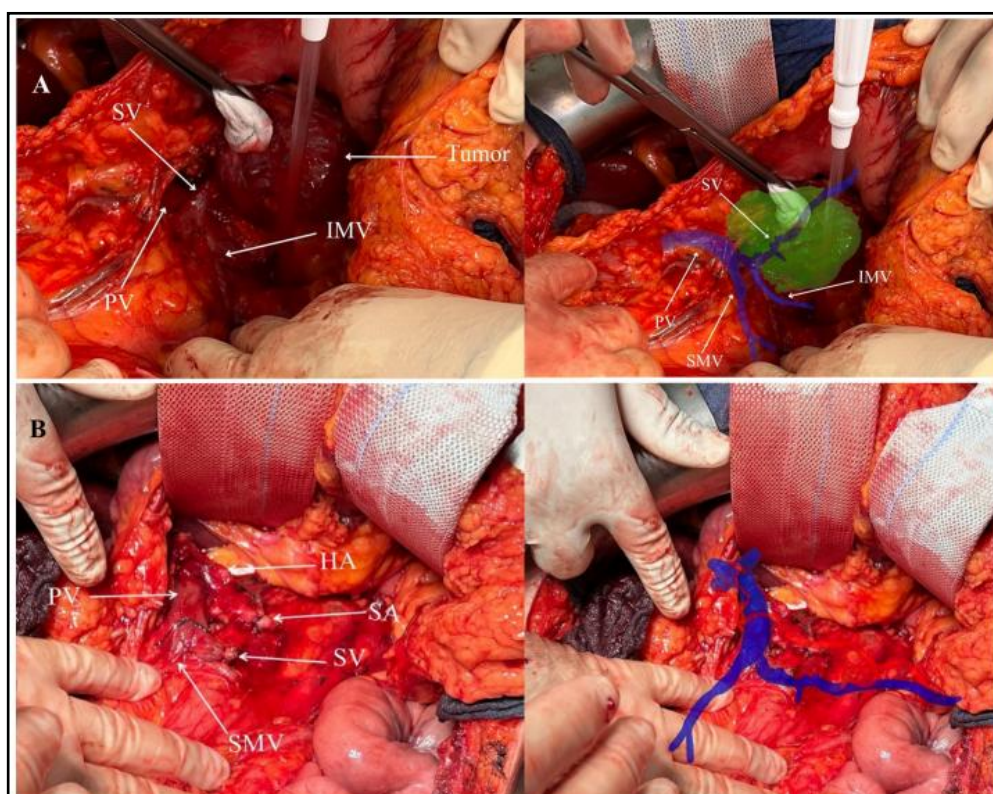


Figure 84. (A) et (B) : vue intra opératoire avec identification du système vasculaire utilisant ARAS, (veine splénique (SV), artère splénique (SA), veine porte (PV), artère hépatique (HA), veine mésentérique supérieure (SMV), veine mésentérique inférieure (IMV)). [173]



Figure 85. Spécimen résequé. [173]

b. Splénectomie :

La splénectomie laparoscopique est souvent associée à des taux élevés de morbidité, notamment dans la prise en charge de la splénomégalie massive. Cela est dû à des défis techniques tels qu'une visualisation limitée de l'espace opératoire et des difficultés dans la manipulation de l'organe.

La dissection de l'artère splénique et du pédicule splénique, en particulier, constitue une étape délicate, avec un risque élevé de saignement incontrôlé. Cependant, le succès de ces interventions repose sur une compréhension approfondie des relations anatomiques entre les structures vasculaires spléniques et les tissus environnants. [174]

Grâce aux avancées en reconstruction tridimensionnelle et aux technologies immersives telles que la réalité augmentée (AR), la réalité virtuelle (VR) et la réalité mixte (MR), les systèmes de chirurgie guidée par imagerie apportent un soutien essentiel.

Une étude a évalué l'impact clinique et la faisabilité technique du système de navigation laparoscopique avec réalité augmentée pour les splénectomies laparoscopiques dans le cas de splénomégalie massive.

Dans cette étude, les données cliniques de 17 patients ayant subi une splénectomie avec guidage par réalité augmentée ont été comparées à celles de 26 patients opérés sans cette technologie.

Cette comparaison permet d'analyser les différences d'efficacité et de résultats entre les deux méthodes, mettant en lumière les avantages potentiels du guidage en réalité augmentée.

Les résultats ont montré une perte sanguine moyenne plus faible dans le groupe avec guidage par réalité augmentée par rapport au groupe témoin, ainsi qu'une durée moyenne de séjour postopératoire significativement plus courte pour les patients du premier groupe. [174]

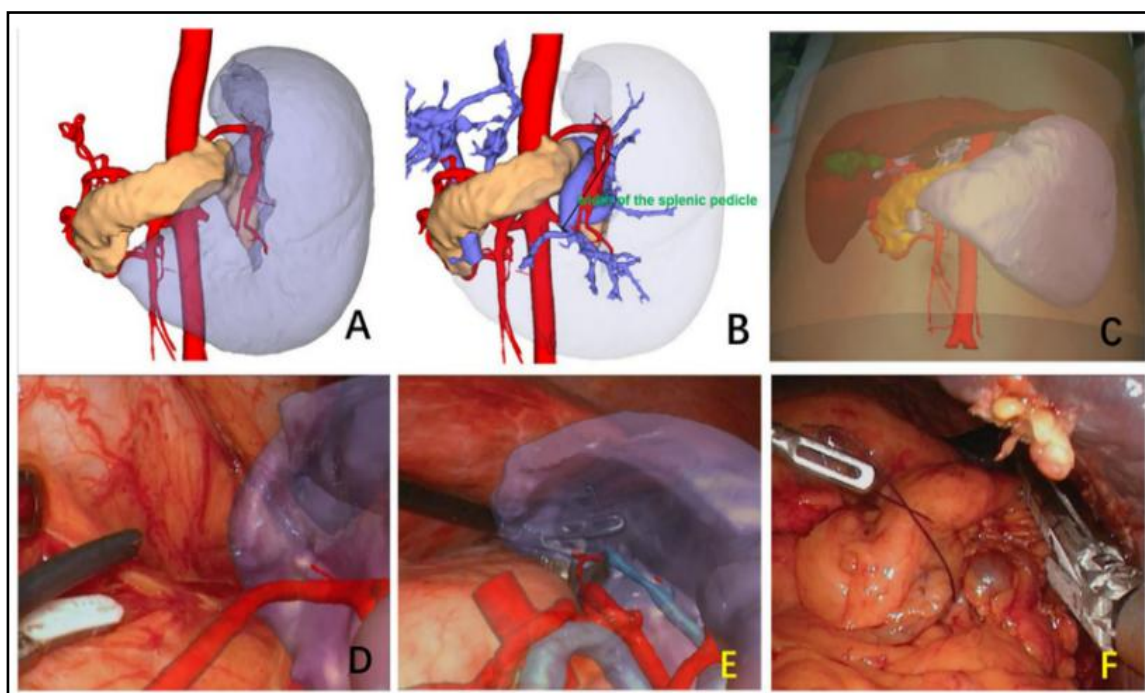


Figure 86. La procédure de splénectomie laparoscopique guidée par RA : (A) Le modèle de reconstruction 3D, la forme de l'artère splénique et sa relation spatiale avec la bordure supérieure du pancréas. (B) La position et la direction du tunnel rétro splénique sont planifiées, et la largeur du pédicule splénique est mesurée. (C) Ponction du trocart guidée par RA. (D) Dissection de l'artère splénique guidée par RA. (E) Établissement du tunnel rétro splénique guidé par RA. (F) Après l'établissement du tunnel du pédicule splénique, le pédicule splénique est suspendu et l'Endo-GIA peut être traversé à travers le tunnel. [174]

En conclusion, l'utilisation de la réalité augmentée dans les splénectomies laparoscopiques pour splénomégalie massive démontre un potentiel significatif pour améliorer les résultats chirurgicaux. La réduction de la perte sanguine et de la durée de séjour postopératoire observée dans le groupe AR souligne l'efficacité de cette technologie.

Ces résultats suggèrent que l'intégration des systèmes de navigation AR pourrait transformer la pratique chirurgicale en rendant les interventions plus sûres et plus efficaces pour les patients

En somme, l'intégration de l'intelligence artificielle et des technologies robotiques dans la phase intra-opératoire marque une avancée transformative en chirurgie viscérale.

En anesthésie, l'IA révolutionne la gestion peropératoire grâce à une surveillance prédictive des patients, une administration personnalisée des agents anesthésiques et une estimation fiable de la profondeur de l'anesthésie, réduisant ainsi les risques de complications et optimisant les résultats cliniques.

Dans le domaine de la chirurgie robotique, des systèmes comme le Da Vinci, Toumai et Dexter démontrent une capacité inégalée à exécuter des tâches complexes avec une précision chirurgicale accrue, tout en minimisant les temps opératoires et les complications postopératoires.

L'automatisation progressive, soutenue par des algorithmes d'IA, permet l'exécution autonome de gestes critiques tels que la suture, l'aspiration et le guidage de la caméra, renforçant la reproductibilité et la sécurité des interventions.

Par ailleurs, les technologies de réalité augmentée (RA) et mixte (RM), comme le HoloLens, offrent une visualisation immersive et interactive des structures anatomiques, superposant des modèles 3D virtuels à l'anatomie réelle pour une navigation chirurgicale plus intuitive. Ces outils, combinés à des marqueurs non invasifs, garantissent un alignement précis des données virtuelles avec les repères anatomiques, minimisant les risques liés aux méthodes invasives.

Ces innovations sont particulièrement bénéfiques dans des procédures complexes telles que la pancréatectomie et la splénectomie, où une visualisation détaillée des structures internes permet de mieux gérer les risques, comme les saignements, et d'optimiser la planification et l'exécution des gestes chirurgicaux.

Enfin, ces technologies facilitent la collaboration à distance entre experts, ouvrant la voie à une chirurgie plus accessible et collaborative. Ensemble, l'IA, la robotique et les technologies immersives transforment la pratique chirurgicale, offrant des interventions plus sûres, précises et moins invasives, tout en améliorant les résultats pour les patients et l'efficacité des équipes chirurgicales.

3. La Phase Post Opératoire :

3.1. La Prediction des Complications Post Opératoires :

Les patients subissant une chirurgie peuvent souffrir de complications postopératoires majeures, telles que les infections et les thromboses, entraînant une mortalité accrue, une augmentation des besoins en soins intensifs, un allongement de la durée du séjour hospitalier postopératoire, ainsi qu'une élévation des coûts des soins.

Bien que certaines de ces complications soient inévitables en raison des facteurs de risque inhérents au patient et à l'intervention chirurgicale, d'autres peuvent être modifiées et potentiellement évitées grâce à l'identification précoce des facteurs de risque du patient et à l'administration de traitements fondés sur des preuves. [175]

Des recherches récentes ont mis en évidence le potentiel de l'intelligence artificielle, ainsi que son efficacité dans la prédiction des complications postopératoires. Ces avancées technologiques permettent une meilleure anticipation des risques, facilitant ainsi une prise en charge plus rapide et ciblée des patients, et contribuant à une réduction des morbidités et des coûts associés aux complications chirurgicales.

a. Thrombo Embolie Veineuse :

Les patients subissant une intervention chirurgicale présentent un risque élevé de développer une thrombo embolie veineuse (TEV).

Une étude a été réalisée pour évaluer les facteurs de risque prédictifs de la thrombo embolie veineuse (TEV) chez les patients opérés en utilisant un modèle de prédiction basé sur des réseaux neuronaux artificiels.

Un total de 1111 patients ayant subi une chirurgie a été inclus, avec des données cliniques extraites des dossiers médicaux. Dix facteurs indépendants, tels que l'âge, l'hypertension et les transfusions sanguines, ont été identifiés comme augmentant le risque de TEV. Le modèle intelligent a montré une performance élevée, avec une précision de 96 %. [176]

b. La Fuite Anastomotique :

La fuite anastomotique est une complication potentiellement mortelle chez les patients atteints d'adénocarcinome gastrique ayant subi une gastrectomie totale ou proximale.

Une étude a été menée pour concevoir un outil de machine learning capable de prédire la survenue de fuites anastomotiques chez les patients atteints d'adénocarcinome gastrique ayant bénéficié d'une gastrectomie totale ou proximale.

Avec un total de 1 660 patients opérés dans un grand hôpital académique entre 2010 et 2019 ont été inclus, puis répartis aléatoirement en ensembles d'entraînement (80 %) et de test (20 %). Quatre modèles de machine learning, intégrant 24 variables cliniques préopératoires et intra-opératoires, ont été développés et rigoureusement évalués selon des critères de performance : sensibilité, spécificité et exactitude. Parmi ces modèles, l'un a particulièrement retenu l'attention avec une sensibilité de 81,8 % et une spécificité de 82,2 % sur l'ensemble de test, ouvrant ainsi la voie à des applications cliniques prometteuses dans l'anticipation et la gestion des complications chirurgicales. [177]

c. Le Reflux Gastro-Œsophagien (RGO) Post-Gastrectomie :

L'utilisation de l'intelligence artificielle pour anticiper l'apparition de la maladie de reflux gastro-œsophagien (RGO) de novo après une gastrectomie est l'un des exemples prometteurs.

Pour concevoir ce modèle, les données de patients souffrant d'obésité sévère ayant subi une gastrectomie ont été analysées et le jeu de données a été divisé en deux groupes : 70 % pour l'entraînement du modèle et 30 % pour la validation.

Grâce à une évaluation approfondie de multiples algorithmes d'apprentissage automatique, les principaux facteurs influençant l'apparition de RGO ont été identifiés, tels que l'âge, le poids, la présence d'un RGO préopératoire, la taille de la sonde gastrique et la distance du premier tir de l'agrafeuse par rapport au pylore. Le modèle IA le plus performant a affiché une sensibilité de 79,2 % et une spécificité de 86,1 %. [178]

d. Le Sepsis Post Greffe Hépatique :

Le sepsis postopératoire est l'une des principales causes de mortalité après une greffe de foie (GF). Dans ce cadre, une étude a été menée afin de développer et valider un modèle prédictif pour le sepsis postopératoire chez les patients ayant subi une greffe de foie, en utilisant des techniques d'apprentissage automatique.

L'étude a impliqué 786 patients ayant reçu une greffe de foie entre janvier 2015 et janvier 2020. Au total, sept modèles ont été développés pour prédire le risque de sepsis postopératoire dans les sept jours suivant la greffe. Parmi ces modèles, les performances ont été évaluées sur la sensibilité, de la spécificité et de la précision. Le modèle ayant obtenu les meilleures performances a été validé sur un jeu de données indépendant, comprenant 118 patients adultes greffés entre février 2020 et avril 2021.

Les résultats ont montré que 216 patients (31,9 %) ont développé un sepsis postopératoire, ce qui a été associé à une augmentation des complications post opératoires, une prolongation du séjour hospitalier et une mortalité accrue.

Les variables les plus importantes pour prédire le sepsis postopératoire étaient un volume élevé d'infusion de globules rouges, l'évacuation de l'ascite, la perte sanguine, le drainage gastrique, un faible volume d'infusion de cristalloïdes et d'urine, un temps d'anesthésie plus long, et un niveau élevé de bilirubine pré opératoire. L'un des modèles a montré les meilleures performances globales avec une précision de 71,6 %, une sensibilité de 62,1 % et une spécificité de 76,1 % lors la validation. [179]

Cette étude a conclu que le modèle prédictif intelligent pouvait être un outil précieux pour aider à la prise de décision clinique en cas de risque de sepsis postopératoire après une greffe de foie.

En traitant de grandes quantités de données cliniques, ces modèles intelligents peuvent identifier les facteurs de risque et prédire les complications avec une grande précision.

3.2. La Surveillance en Post Opératoire :

En chirurgie viscérale, la période postopératoire est souvent une course contre la montre, où chaque instant compte pour prévenir et gérer les complications. C'est ici que l'intelligence artificielle entre en scène, transformant cette surveillance critique en un véritable acte d'anticipation.

Grâce à des algorithmes capables de décrypter des milliers de données en temps réel, l'IA agit comme un vigile infatigable, repérant les signaux subtils que l'œil humain pourrait manquer. Elle promet non seulement de détecter l'imprévisible, mais aussi de redéfinir les standards de la sécurité et de la personnalisation des soins.

a. La Température Corporelle :

La température corporelle constitue un paramètre vital essentiel dans l'évaluation de l'état clinique des patients. Les individus subissant une intervention chirurgicale sont fréquemment soumis à des conditions environnementales froides, à des perfusions intraveineuses non réchauffées, à des invasions bactériennes ainsi qu'à l'administration de substances anesthésiques pouvant perturber les mécanismes de thermorégulation, entraînant ainsi des dérèglements thermiques.

Une surveillance précise et continue de la température corporelle est cruciale pour la prévention de l'hypothermie et la détection précoce des complications infectieuses post chirurgicales.

Le **iThermonitor** (WT705) de Raiing Medical est un thermomètre axillaire sans fil de nouvelle génération, intégré avec intelligence artificielle, conçu pour une surveillance continue et non invasive de la température corporelle des patients opérés. Ce dispositif permet un suivi constant pendant la période post-opératoire, en offrant une surveillance discrète et sans interférer avec les activités quotidiennes des patients, tout en aidant à prévenir l'hypothermie et à détecter les complications infectieuses en temps réel. [180]



Figure 87. Le dispositif intelligent : iThermonitor. [180]

L'efficacité de l'**iThermonitor** a été démontrée dans une étude prospective menée sur 526 patients adultes ayant subi une chirurgie. Les résultats ont montré que les températures mesurées par **iThermonitor** étaient très proches de celles obtenues par des thermomètres à mercure classiques. De plus, l'appareil a permis de détecter les fièvres plus tôt jusqu'à 4,35 heures avant les observations intermittentes. Ainsi que les patients ont trouvé le port de l'**iThermonitor** relativement confortable, sans impact significatif sur leurs activités quotidiennes.[180]

b. La Tension Artérielle :

L'hypotension postopératoire, fréquente dans les jours suivant une chirurgie, est associée à des complications graves.

L'hypotension se définit comme une pression artérielle moyenne (PAM) inférieure à 65 mmHg pendant au moins 15 minutes consécutives, au cours des deux premiers jours postopératoires. Cependant, cette condition reste souvent non détectée dans les services hospitaliers standards, où la pression artérielle n'est mesurée qu'une fois toutes les 4 à 8 heures.

En revanche, dans les unités de soins intensifs, où la surveillance continue via des cathéters artériels est courante, ce problème est mieux pris en charge.

La surveillance continue de la pression artérielle dans les services hospitaliers classiques, à l'aide de dispositifs non invasifs, miniaturisés et portables, représente une avancée prometteuse dans la gestion des patients postopératoires.

Parmi les technologies disponibles, on retrouve les capteurs basés sur la photo pléthysmographie, tels que les capteurs digitaux, les dispositifs portés au poignet et les patchs thoraciques. Cependant, les performances de ces dispositifs restent variables, et une proportion importante d'entre eux ne satisfait pas encore les normes internationales en matière de fiabilité et de précision. L'intégration de l'intelligence artificielle dans ce domaine pourrait révolutionner les pratiques actuelles, notamment par la prédiction des épisodes d'hypotension avant leur survenue.

Le logiciel **Hypotension Prediction Index (HPI)** illustre cette innovation en exploitant des algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser les courbes de pression artérielle et évaluer le risque d'hypotension. Ce modèle prédictif repose sur l'analyse de 3 022 caractéristiques extraites par cycle cardiaque à partir des ondes de pression artérielle haute-fidélité. [181] [182]

Les performances de l'algorithme sont remarquables :

Tableau 2 : Les performances du logiciel : Hypotension Prediction Index (HPI).

Les performances du logiciel : Hypotension Prediction Index (HPI)		
<u>Temps avant l'événement:</u>	<u>Sensibilité:</u>	<u>Spécificité:</u>
15 minutes	88 %	87 %
10 minutes	89 %	90 %
5 minutes	92 %	92 %

Ces résultats illustrent l'efficacité de l'algorithme pour prédire les événements hypotensifs de manière précise et précoce, offrant ainsi un outil prometteur pour améliorer la prise en charge des patients à risque. [182]

3.3. La Gestion Post Opératoire des Hospitalisations :

La gestion efficace des capacités hospitalières est cruciale pour assurer la disponibilité continue des lits de soins postopératoires, particulièrement en période de forte affluence.

Un séjour prolongé à l'hôpital, lorsqu'il n'est pas justifié, expose les patients à un risque accru de complications iatrogènes, tandis qu'une sortie trop précoce peut retarder la détection et la prise en charge des complications.

Ces deux scénarios augmentent la morbidité et la mortalité postopératoires, tout en altérant la qualité de vie des patients. Il est donc essentiel de définir un moment de sortie hospitalière qui soit à la fois opportun et sécurisé.

Dans le cadre de l'optimisation de la gestion hospitalière, une étude récente, intitulée DESIRE (Discharge aftEr Surgery using aRtificial intElligence), a évalué un modèle d'intelligence artificielle pour prédire un moment de sortie hospitalière sûr après une chirurgie.

Ce modèle, initialement développé et validé sur 1 677 patients ayant subi des chirurgies gastro-intestinales ou oncologiques, avait montré de solides performances. L'étude a donc visé à valider ce modèle dans trois hôpitaux non académiques aux Pays-Bas, sur 1 693 épisodes de soins entre janvier 2017 et juin 2021, chez des patients restant hospitalisés au moins deux jours après leur intervention.

L'objectif principal était de prédire les interventions hospitalières imprévues après le deuxième jour postopératoire (réinterventions, interventions radiologiques et/ou antibiothérapie intraveineuse).

Quatre modèles ont été entraînés localement et évalués en termes de sensibilité et de spécificité. Les résultats ont montré de fortes performances des modèles, avec une sensibilité de 77,9 %, une spécificité de 79,2 %. Ces données confirment la capacité du modèle à s'adapter à des contextes différents (hôpitaux académiques versus non académiques) grâce à un entraînement sur des données locales. [183]

Une autre étude récente a cherché à développer un modèle prédictif basé sur des algorithmes d'apprentissage automatique pour évaluer le risque de prolongation de l'hospitalisation chez les patients atteints de cancer colorectal après chirurgie.

Cette étude a inclus 83 patients et a collecté 40 variables cliniques allant des facteurs préopératoires aux éléments postopératoires.

L'étude a testé plusieurs modèles et les résultats ont montré que l'un des modèles était le plus performant, avec une spécificité de 99%, ce qui indique une excellente capacité du modèle à identifier correctement les patients sans risque de prolongation de l'hospitalisation. Le modèle a permis de prédire avec précision la durée d'hospitalisation, offrant aux professionnels de santé un outil précieux pour personnaliser les soins et améliorer la gestion des ressources hospitalières.[184]

L'utilisation de ce concept basé sur l'intelligence artificielle dans le flux clinique pourrait faciliter des sorties postopératoires plus rapides, tout en réduisant les journées d'hospitalisation inutiles.

3.4. Rédaction Automatique des Comptes Rendu Opératoires :

La documentation chirurgicale, bien que cruciale dans la routine clinique, c'est un processus souvent long et complexe. Son rôle principal est de transmettre des informations relatives à une intervention chirurgicale à d'autres professionnels de santé, mais elle revêt également une importance accrue pour l'extraction de données à des fins scientifiques, administratives et judiciaires.

Les chirurgiens sont tenus de fournir des rapports opératoires détaillés et précis, mais les notes manuscrites non structurées sont souvent de mauvaise qualité.

L'introduction de l'intelligence artificielle, notamment l'apprentissage automatique et les réseaux neuronaux convolutionnels, a permis d'automatiser l'extraction d'événements indésirables et de générer des rapports chirurgicaux complets en reconnaissant les différentes phases de l'intervention et les instruments utilisés. [185]

3.5. La Réhabilitation Améliorée Après Chirurgie (RAAC) :

La réhabilitation améliorée après chirurgie (RAAC) repose sur une approche multimodale visant à accélérer la récupération postopératoire tout en réduisant les complications et la durée d'hospitalisation. Si l'optimisation préopératoire et les techniques chirurgicales mini-invasives jouent un rôle central, la phase postopératoire reste un élément clé du succès de ces protocoles.

Cependant, l'hétérogénéité des patients et la variabilité des prises en charge constituent des défis majeurs.

L'intelligence artificielle constitue un levier fondamental dans l'optimisation des protocoles de récupération améliorée après chirurgie (RAAC). En complément des systèmes de prédiction des complications et de surveillance continue, l'IA permet une personnalisation avancée des soins grâce à l'analyse en temps réel des paramètres physiologiques et des données cliniques du patient. Cette approche contribue à une optimisation de la gestion de la douleur, de l'apport nutritionnel et de la mobilisation précoce. [186]

3.6. La Télémédecine et la Surveillance A Distance :

La surveillance à distance émerge comme un outil clé dans l'amélioration des soins postopératoires, permettant un suivi en temps réel des patients après leur sortie de l'hôpital.

La télémédecine permet la réalisation de consultations de suivi virtuelles, limitant ainsi les réadmissions hospitalières pour des examens réguliers. Ce modèle réduit non seulement le risque d'infections nosocomiales, mais encourage également les patients à poursuivre leur réhabilitation à domicile.

Grâce aux plateformes de vidéoconférence sécurisées, les chirurgiens peuvent assurer un suivi régulier de la cicatrisation des plaies en observant leur évolution à distance. Ils peuvent également écouter attentivement les préoccupations des patients, répondre à leurs questions et les rassurer sur leur rétablissement.

Cette approche permet d'adapter rapidement les plans de traitement en fonction des besoins spécifiques de chaque patient, sans nécessiter de consultations physiques, réduisant ainsi les déplacements inutiles et le risque d'infections nosocomiales. [187]

Une autre avancée significative réside dans la surveillance à distance, qui repose sur l'utilisation de dispositifs portables et de capteurs implantés pour monitorer les paramètres vitaux des patients, tels que la fréquence cardiaque, la saturation en oxygène, la pression artérielle et la température. [187]

Ces appareils transmettent en continu des données aux professionnels de santé, leur permettant de détecter précocement des problèmes chirurgicaux tels que les infections, les thromboses ou les arythmies.



Figure 88. Exemples de dispositifs de surveillance à distance. [188]

Un autre exemple est celui des pansements intelligents, équipés de capteurs capables de mesurer la température et l'humidité des plaies, permettant ainsi de détecter précocement les signes d'infection. Par ailleurs, la surveillance en temps réel de la perfusion tissulaire et de la cicatrisation grâce à des dispositifs implantés offre un suivi précis de l'évolution de l'état du patient. [189]

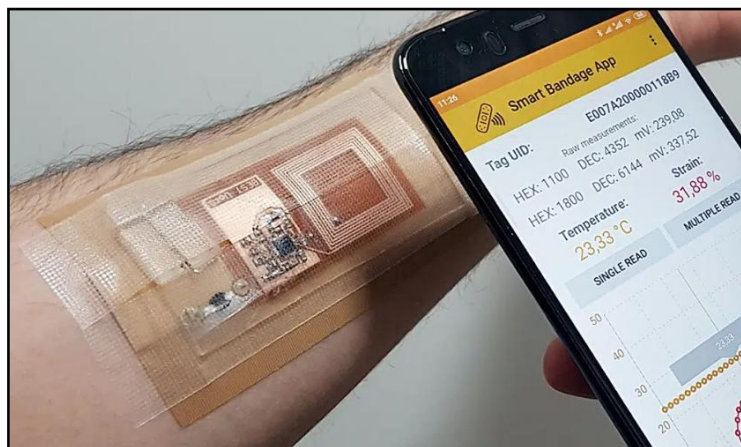


Figure 89. Pansement intelligent : VeCare. [190]

Ces technologies sont également d'une grande utilité dans le cadre des protocoles de Récupération Améliorée Après Chirurgie (RAAC).

Plusieurs études ont démontré que les patients présentant une faible mobilité, tant en phase préopératoire qu'en période postopératoire, présentent un risque accru de complications, de réadmissions et d'issues défavorables

Dans ce cadre, l'optimisation de la mobilisation précoce après une chirurgie constitue un principe fondamental des protocoles de récupération améliorée après chirurgie (RAAC).

Cependant, l'intégration des technologies numériques, notamment ces dispositifs portables (wearables), représente une approche innovante pour suivre et encourager l'activité physique postopératoire, avec pour objectif d'accélérer la récupération et de réduire le risque de complications.

L'exploitation des données issues des dispositifs portables pour fournir un retour d'information ciblé aux patients et aux chirurgiens représente une perspective prometteuse. Cette approche pourrait influencer positivement les comportements et les décisions thérapeutiques, en intégrant des stratégies optimales d'adaptation et de suivi individualisé. [191]

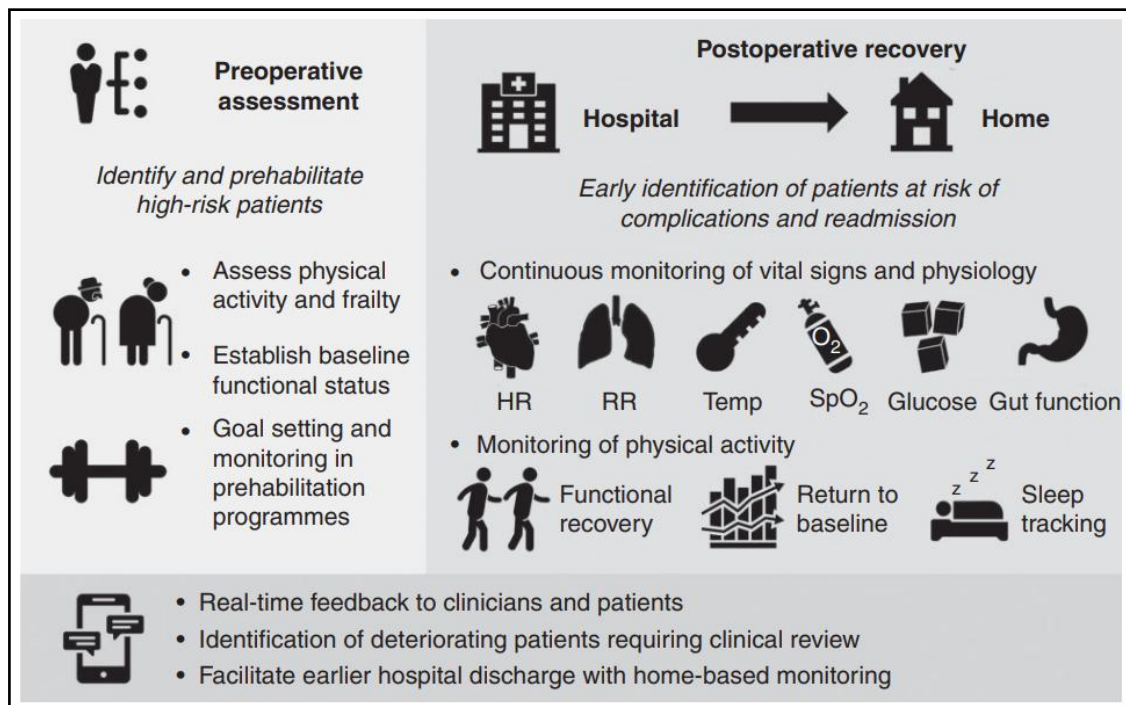


Figure 90. Applications potentielles des dispositifs portables dans la prise en charge préopératoire et postopératoire des patients opérés pour une chirurgie abdominale majeure. [191]

En somme, l'intégration de l'intelligence artificielle et des technologies connectées révolutionne la gestion des soins postopératoires en chirurgie viscérale. En complément des protocoles de Récupération Améliorée Après Chirurgie (RAAC), l'IA permet d'optimiser la surveillance, d'adapter les traitements et d'anticiper les complications, offrant ainsi une prise en charge plus ciblée et personnalisée.

Grâce aux algorithmes d'apprentissage automatique, l'IA permet une détection précoce des complications postopératoires telles que les infections, les troubles hémodynamiques ou les fuites anastomotiques.

S'appuyant sur des dispositifs connectés tels que l'iThermonitor et le Hypotension Prediction Index (HPI), elle assure un suivi continu des paramètres vitaux, permettant une intervention rapide en cas d'anomalie.

Dans le cadre de la RAAC, ces innovations technologiques facilitent la personnalisation des soins postopératoires. L'analyse en temps réel des données du patient permet d'adapter les protocoles de gestion de la douleur, de nutrition et de mobilisation précoce, éléments essentiels pour une récupération optimale.

Cependant, les dispositifs intelligents de suivi de l'activité physique jouent également un rôle déterminant en identifiant les patients nécessitant un soutien spécifique et en encourageant une reprise progressive des activités physiques.

Par ailleurs, l'IA améliore la gestion des ressources hospitalières en prédisant la durée d'hospitalisation et en ajustant les plans de suivi en fonction des risques individuels. L'automatisation de certaines tâches administratives, telles que la rédaction des comptes rendus opératoires, permet aux professionnels de santé de se concentrer davantage sur des décisions cliniques stratégiques.

En intégrant ces avancées dans les protocoles de soins, l'IA redéfinit les standards de la prise en charge postopératoire en chirurgie viscérale.

Elle favorise une approche plus prédictive, proactive et efficiente, améliorant les résultats chirurgicaux, réduisant les durées de convalescence et optimisant l'utilisation des ressources médicales, ouvrant ainsi la voie à une chirurgie plus performante et centrée sur le patient.

4. L'utilisation de l'Intelligence Artificielle dans la Formation des Etudiants et des Résidents en Chirurgie Viscerale :

Avant d'aborder les différentes méthodes et technologies intelligentes utilisées pour améliorer la formation et développer les compétences chirurgicales, il est essentiel de définir les systèmes intelligents d'éducation et de formation.

Par définition, un système intelligent d'éducation ou de formation est un programme intelligent qui agit pour accomplir ou soutenir l'accomplissement des tâches éducatives traditionnellement effectuées exclusivement par des éducateurs en chirurgie, en prenant des décisions de manière similaire aux éducateurs et en fournissant une adaptation personnalisée, y compris l'évaluation des performances. [192]

4.1. La Formation des Etudiants:

L'enseignement de la chirurgie constitue un pilier fondamental de la formation médicale, permettant aux étudiants de comprendre la pathogénie des maladies, leurs manifestations cliniques et leurs modalités de prise en charge.

Traditionnellement, cet enseignement repose sur l'apprentissage théorique à travers les manuels et les cours magistraux, ainsi que sur l'expérience pratique acquise au stages hospitaliers bloc opératoire. Cependant, ces approches présentent des limites, notamment en raison des contraintes liées à l'accès aux interventions chirurgicales et à la variabilité des cas cliniques rencontrés.

L'intelligence artificielle révolutionne l'enseignement de la chirurgie, notamment en chirurgie viscérale, en offrant des outils qui facilitent l'apprentissage des compétences chirurgicales à travers des approches interactives et personnalisées.

En combinant des technologies avancées telles que l'analyse prédictive et les simulations réalistes, l'IA permet de répondre aux besoins d'une formation moderne et dynamique. [193]

Ces innovations trouvent leur application dans plusieurs aspects clés de l'éducation chirurgicale, comme l'amélioration de la précision diagnostique et la personnalisation de l'apprentissage, en offrant des expériences plus engageantes et adaptées aux étudiants. [193]

a. Amélioration de la précision diagnostique et de l'apprentissage des pathologies chirurgicales :

Les algorithmes d'IA permettent d'analyser de vastes quantités de données cliniques et d'imagerie médicale avec une grande précision. En chirurgie viscérale, ces outils sont capables d'identifier des anomalies subtiles sur les scanners ou les IRM, facilitant ainsi l'apprentissage des diagnostics complexes.

L'intégration de ces technologies dans les plateformes pédagogiques permet aux étudiants d'accéder à des cas cliniques enrichis et de mieux comprendre les relations anatomopathologiques sous-jacentes aux différentes pathologies chirurgicales. [193]

b. Personnalisation de l'apprentissage et la rétroaction immédiate:

Les systèmes d'apprentissage basés sur l'IA peuvent adapter le contenu pédagogique aux besoins spécifiques de chaque étudiant. À travers des plateformes interactives, l'IA analyse les performances individuelles et propose des exercices ciblés, favorisant ainsi un apprentissage plus efficace et progressif.

De plus, l'intégration de mécanismes de rétroaction immédiate dans les simulateurs chirurgicaux permet aux étudiants de corriger leurs erreurs en temps réel, renforçant leur maîtrise des gestes techniques essentiels. [193]

c. Simulation et Apprentissage Immersif par Réalité Virtuelle/ Réalité Augmentée:

La réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (AR) constituent des outils pédagogiques majeurs dans la formation chirurgicale. Elles permettent aux étudiants de manipuler des modèles 3D d'organes, de réaliser des dissections virtuelles et de s'exercer à des interventions chirurgicales dans un environnement immersif.

En chirurgie viscérale, l'utilisation de la VR/AR facilite l'apprentissage des techniques complexes, telles que la laparoscopie et la chirurgie assistée par robot, en offrant aux apprenants la possibilité de s'exercer de manière répétitive sans risque pour le patient. [193]

L'enseignement de la chirurgie hépatique représente un défi majeur en raison de la complexité des interventions et des particularités anatomiques du foie.

Dans ce contexte, l'intégration des environnements de Réalité Virtuelle (VR) et de Réalité Augmentée (AR) dans la formation des étudiants en médecine constitue une avancée technologique majeure.

Un prototype d'environnement d'apprentissage multi-utilisateurs en réalité virtuelle (VR) et augmentée (AR) a été développé pour soutenir la formation des étudiants en chirurgie hépatique.

Ce système innovant permet d'introduire les étudiants aux techniques chirurgicales complexes liées aux tumeurs hépatiques, tout en facilitant l'apprentissage de la planification chirurgicale. Le prototype propose des cas cliniques basés sur les tumeurs hépatiques les plus fréquemment rencontrées, accompagnés de modèles 3D, de données volumétriques, d'informations médicales et de traitements.

Ces cas sont accessibles via une bibliothèque virtuelle, où les étudiants peuvent sélectionner des cas spécifiques pour les explorer de manière autonome ou en groupe, favorisant l'apprentissage par résolution de problèmes. L'intégration d'une interface VR/AR permet aux utilisateurs d'interagir librement avec les données, de les trier dynamiquement selon des critères spécifiques, et d'obtenir des informations médicales supplémentaires en temps réel. [194]

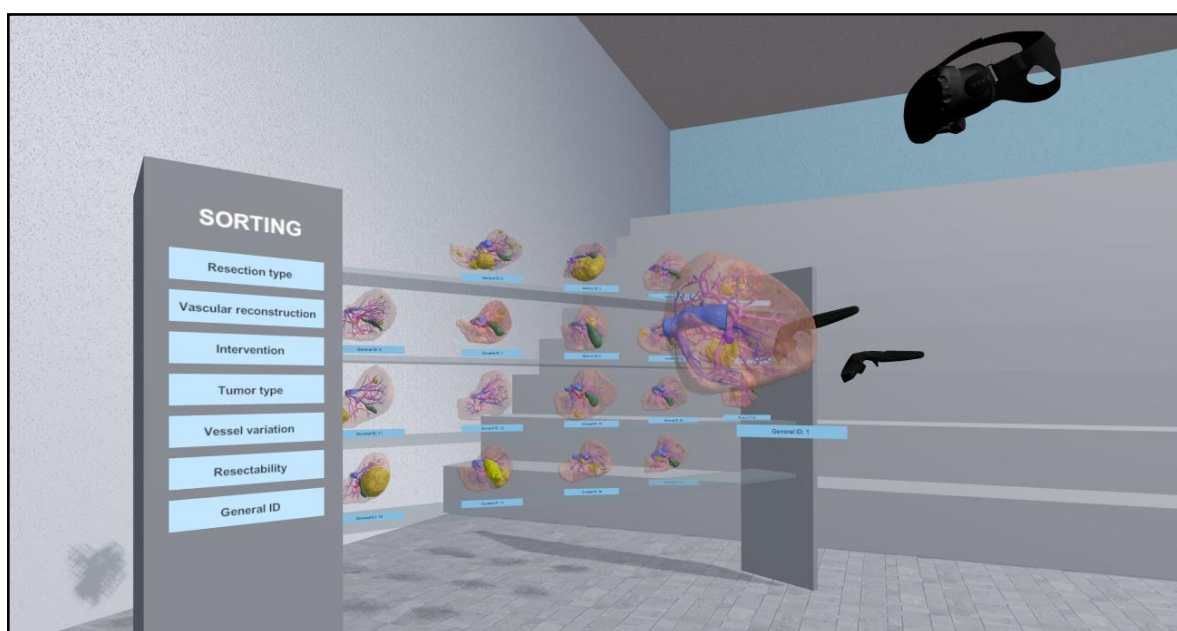


Figure 91. Bibliothèque virtuelle avec plusieurs situations en 3D. [194]

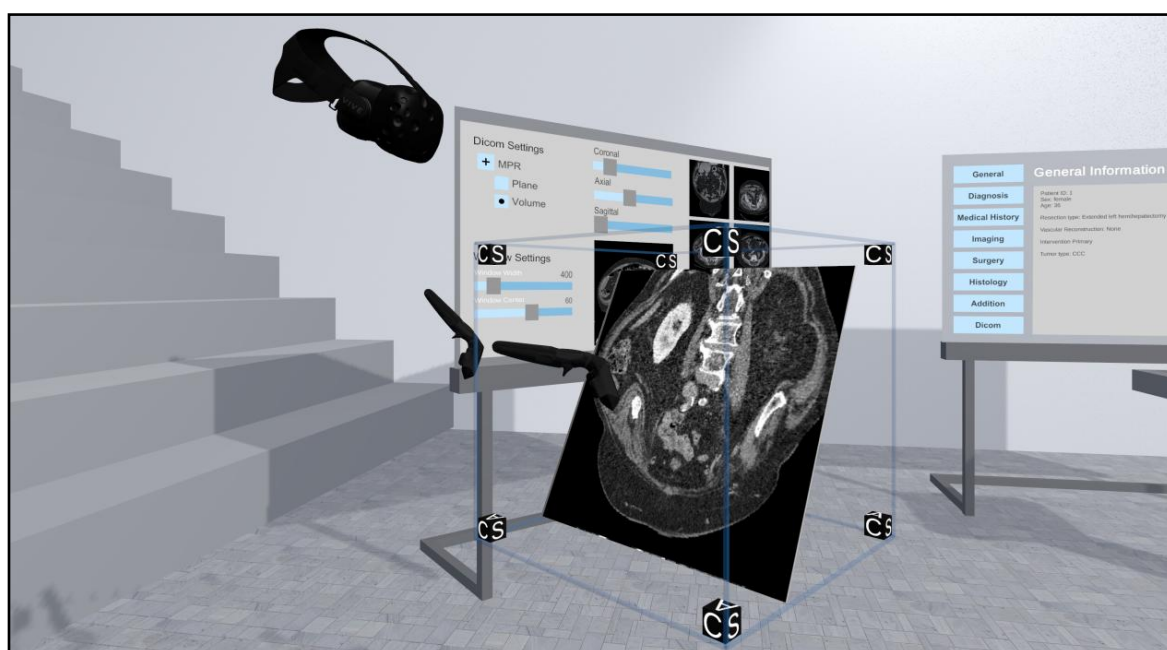


Figure 92. Espace virtuel avec les images de TDM et les données associées affichées dans un tableau en 2D. [194]

Le système supporte l'apprentissage en présentiel ou à distance, et est compatible avec différents dispositifs allant des casques VR/AR aux ordinateurs de bureau.

Cette approche innovante a permis d'améliorer la compréhension des relations anatomiques complexes, telles que les systèmes vasculaires du foie, et d'aider les étudiants à visualiser les effets d'une résection sur ces structures critiques.

Les résultats préliminaires ont montré une bonne acceptabilité et une utilisation intuitive du système. Les participants ont particulièrement apprécié la possibilité de saisir et de manipuler directement les organes virtuels, bien que certaines interactions aient nécessité des ajustements pour améliorer l'expérience.

Ce prototype offre des perspectives intéressantes pour intégrer des technologies avancées dans l'enseignement des chirurgies complexes et pourrait être adapté à d'autres spécialités chirurgicales. [194]

L'intelligence artificielle constitue une avancée prometteuse dans l'enseignement de la chirurgie viscérale, en offrant des outils innovants pour améliorer l'acquisition des connaissances et des compétences pratiques.

Son intégration dans la formation des étudiants en médecine permet d'optimiser la précision diagnostique, de personnaliser les parcours d'apprentissage et de renforcer l'entraînement technique grâce aux simulations immersives.

4.2. La Formation des Résidents:

Avec la complexité croissante des procédures chirurgicales au cours de la dernière décennie, une formation et une éducation optimales ont pris une importance accrue.

Les méthodes traditionnelles de formation des nouveaux chirurgiens ont tendance à se concentrer sur des tâches en présentiel et l'apprentissage par répétition, mais les restrictions imposées par les heures de travail et les tâches administratives en attente réduisent le temps que les résidents passent dans la salle d'opération avec des mentors expérimentés.

Les résidents en chirurgie sont exposés à une gamme d'opérations significativement plus étroite au cours des 20 dernières années, ce qui a soulevé des inquiétudes concernant leur compétence pour une pratique indépendante. [195]

a. La réalité virtuelle et réalité augmentée dans la formation chirurgicale :

L'utilisation de la RV pendant la formation chirurgicale a démontré de nombreux avantages, notamment des améliorations en termes d'efficacité, de connaissances, de manipulation des tissus et de réduction des taux d'erreur, comparé à la méthode traditionnelle basée sur l'apprentissage par compagnonnage.

▪ Le Lap-PASS LP-100 :

C'est un système révolutionnaire de simulation en réalité virtuelle, le Lap-PASS LP-100, qui a vu le jour pour transformer l'apprentissage durant les dissections laparoscopiques du côlon sigmoïde. Grâce à un retour haptique précis, ce système capte la tension exercée sur les tissus et bloque la dissection si cette tension n'est pas correctement ajustée, rendant l'expérience aussi réaliste qu'efficace.

Lors d'une étude impliquant 50 participants pour évaluer les performances de Lap-PASS LP-100, les résultats ont été satisfaisants. Les chirurgiens experts ont démontré des performances nettement supérieures aux novices, surtout en matière d'efficacité.

Ce système, novateur et interactif, ouvre la voie à une nouvelle ère d'apprentissage chirurgical, où la maîtrise des gestes et de la précision devient un véritable jeu de simulation.

L'adoption de Lap-PASS LP-100 pourrait considérablement réduire la courbe d'apprentissage des chirurgiens en formation, leur permettant d'acquérir des compétences essentielles dans un environnement contrôlé et sans risque pour le patient. De plus, ce système offre la possibilité de personnaliser les scénarios de simulation en fonction des besoins spécifiques de chaque apprenant, optimisant ainsi l'efficacité de la formation.

À terme, l'intégration de ce type de simulation dans les programmes de formation chirurgicale pourrait standardiser l'enseignement des techniques laparoscopiques, garantissant ainsi une qualité de soins homogène et élevée pour les patients[196]

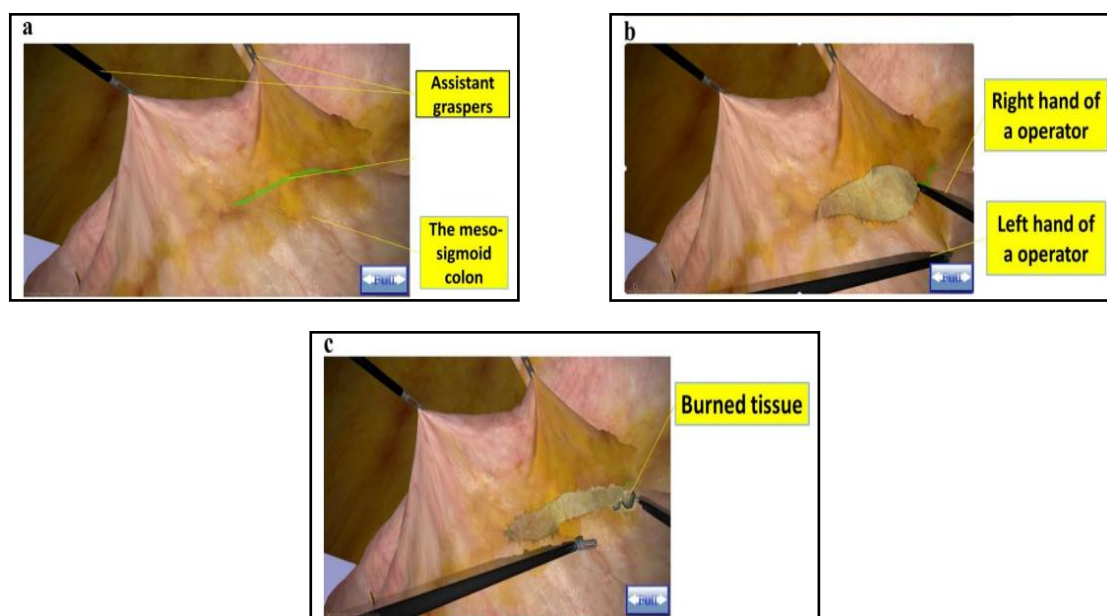


Figure 93. (a) La simulation en réalité virtuelle recrée une scène de colectomie sigmoïde laparoscopique, avec une ligne verte représentant la coupe planifiée. (b) La simulation permet de répliquer la structure de la membrane, où la coupe est réussie seulement si la main gauche exerce une tension suffisante sur le tissu. (c) Une coupe claire ne peut pas être réalisée sans tension, et un excès de tension provoque la déchirure du tissu, avec un retour de force pour ajuster la tension. [196]

▪ **Le Holo Pointer :**

Le Holo Pointer, une technologie de réalité augmentée, conçu pour améliorer la formation en chirurgie laparoscopique en offrant un pointeur virtuel interactif. Dans un cadre pré-clinique, il a été comparé aux méthodes traditionnelles basées sur la communication verbale et gestuelle.

L'utilisation du Holo Pointer a permis d'améliorer l'économie de mouvement, de réduire le taux d'erreurs et d'optimiser les performances des utilisateurs sans prolonger le temps de réalisation des procédures.

Cette technologie offre une guidance visuelle plus claire et moins ambiguë, ce qui favorise une meilleure concentration et une plus grande précision dans les mouvements des instruments.

Les retours des participants ont été positifs, bien que le port du dispositif ait occasionné un léger inconfort.

Ces résultats démontrent l'efficacité du Holo Pointer comme outil d'entraînement dans la chirurgie laparoscopique, avec des avantages notables en termes de performance sans affecter la durée des procédures. [197]

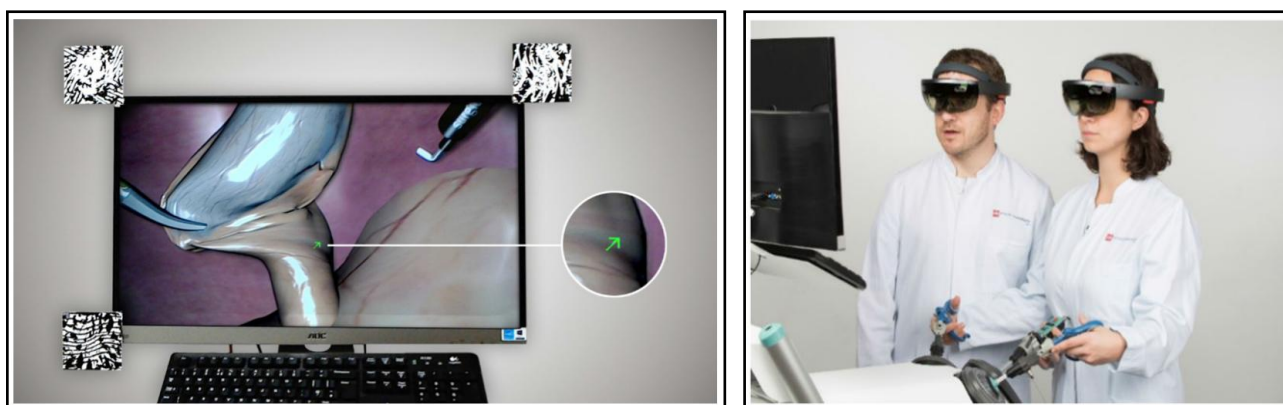


Figure 94. La vue à travers les HoloLens. Le chirurgien (à gauche) guide une résidente (à droite) lors d'une chirurgie laparoscopique virtuelle en utilisant un casque de réalité augmentée transparent. [197]

b. Telementoring :

Telementoring ou télé-mentorat est l'une des applications les plus prometteuses de la RA dans l'éducation chirurgicale. Il permet à un chirurgien expert (mentor) de fournir une assistance virtuelle en temps réel à un résident au cours d'une opération, tout en se trouvant à distance.

Le Telementoring s'est avéré être un outil pédagogique efficace offrant plusieurs avantages sans augmenter la durée opératoire. Cependant, il nécessite encore généralement une intervention humaine et un retour d'information manuel. [198]

▪ **SurgSmart :**

Le système SurgSmart, développé par une équipe chirurgicale de l'Hôpital de l'Ouest de la Chine, représente une avancée significative dans le domaine de la chirurgie assistée par intelligence artificielle. Conçu pour répondre aux défis des interventions mini-invasives dans des zones reculées, ce dispositif repose sur des algorithmes d'apprentissage automatique permettant de détecter automatiquement les phases critiques et les événements clés au cours d'une procédure chirurgicale. Lorsqu'un moment critique est identifié, SurgSmart alerte immédiatement les chirurgiens experts, qui peuvent alors fournir des conseils en temps réel via des communications vocales ou textuelles.

Grâce à des marqueurs anatomiques dynamiques, ces experts peuvent indiquer précisément les structures ou plans de dissection, offrant ainsi un soutien visuel optimisé pour améliorer la précision du chirurgien opérant à distance. En parallèle, l'intégration de SurgSmart dans la formation chirurgicale, notamment robotique, permet de superviser des exercices et simulations utilisant des modèles 3D d'haute-fidélité. [199,200]

En conclusion, l'intégration des technologies émergentes, telles que la réalité virtuelle, la réalité augmentée et le télémentoring, dans la formation chirurgicale offre de nouvelles perspectives pour l'éducation des résidents, permettant de pallier les limitations des méthodes traditionnelles.

4.3. Évaluation des compétences chirurgicales des Résidents :

L'évaluation des compétences des résidents en chirurgie viscérale repose sur la nécessité de disposer de données fiables et objectives, ce qui demeure un défi majeur. Afin de surmonter cette difficulté, les chercheurs mettent en place des méthodes innovantes et standardisées visant à éliminer la subjectivité et à offrir une analyse plus précise des performances chirurgicales.

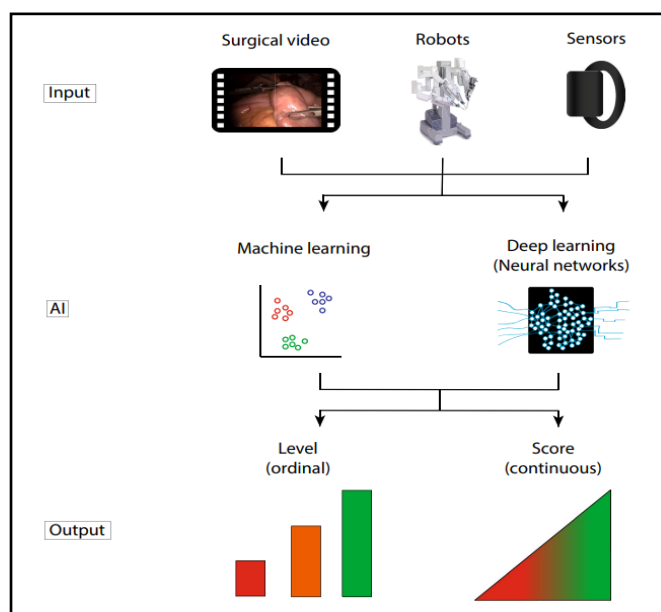


Figure 95. Illustration d'évaluation automatisée des compétences techniques en chirurgie par intelligence artificielle. [201]

Dans ce cadre, un algorithme utilisant un réseau neuronal convolutionnels (CNN) a été conçu pour analyser les vidéos de cholécystectomie laparoscopique pour une meilleure évaluation des compétences chirurgicales des chirurgiens.

Cet algorithme localise les instruments chirurgicaux dans chaque image et observe leurs mouvements au cours de l'intervention. En corrélant les caractéristiques du mouvement avec le niveau de compétence, il distingue les performances optimales des suboptimales, où les mouvements ciblés sont synonymes de compétence, tandis que des mouvements désordonnés signalent des insuffisances. Avec une précision de 87 %, cet outil offre une évaluation objective et fiable des compétences chirurgicales, révolutionnant ainsi la formation des chirurgiens. [202]

▪ LapBot Safe Chole :

LapBot Safe Chole est une application mobile éducative visant à optimiser l'apprentissage de la cholécystectomie laparoscopique en utilisant l'intelligence artificielle pour fournir des retours en temps réel lors de la prise de décision chirurgicale.

L'application propose des simulations où les utilisateurs doivent identifier les zones sûres de dissection. À chaque réponse, l'IA attribue un score de précision et fournit des retours détaillés sur les zones de dissection sûres et dangereuses. Elle propose cinq niveaux de difficulté croissante, et les utilisateurs doivent réussir cinq rondes consécutives avec un score supérieur à 50 % pour progresser.

Les tests effectués ont montré une amélioration des performances avec la pratique, les chirurgiens plus expérimentés atteignant les meilleurs scores plus rapidement que les résidents. Cette approche ludique et interactive, assistée par IA, contribue à une formation plus sécurisée et motivante pour les chirurgiens en formation. [203]



Figure 96. Screenshots de l'interface LapBot Safe Chole : Le joueur choisit la zone de dissection optimale à partir d'une image vidéo, puis reçoit un retour sur sa décision avec l'annotation IA de la zone "Go". Pour passer au niveau suivant, il doit réussir cinq rondes consécutives. [203]

L'intelligence artificielle, couplée à des outils interactifs, transforme la formation chirurgicale en offrant des évaluations dynamiques et personnalisées.

La réalité virtuelle, notamment à travers des dispositifs comme le Lap-PASS LP-100, simule des environnements chirurgicaux réalistes où les résidents peuvent perfectionner leurs gestes techniques dans un cadre contrôlé. De même, les technologies de réalité augmentée, telles que le Holo Pointer, offrent une interaction directe et une meilleure compréhension des gestes laparoscopiques, tout en permettant une réduction des erreurs et une amélioration de la précision.

Le Telementoring, en tant qu'outil pédagogique, permet de surmonter les contraintes géographiques et temporelles, offrant ainsi une assistance en temps réel aux résidents par des experts, même à distance. Cette approche s'avère particulièrement prometteuse pour l'éducation en chirurgie mini-invasive, notamment dans les zones éloignées ou les centres de formation manquant de spécialistes.

L'implémentation du système SurgSmart représente un exemple tangible de la manière dont l'intelligence artificielle peut guider en temps réel les chirurgiens tout en renforçant la qualité de la formation.

Enfin, l'évaluation des compétences chirurgicales des résidents bénéficie également de ces nouvelles technologies. L'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle, comme ceux présents dans l'analyse des vidéos de cholécystectomie laparoscopique et dans l'application LapBot Safe Chole, permet de mesurer les performances des chirurgiens de manière objective et dynamique.

Ces outils offrent une évaluation continue et personnalisée des compétences techniques, contribuant ainsi à une meilleure formation et à une plus grande sécurité des patients.

Ainsi, l'ensemble de ces technologies convergentes ouvre des perspectives passionnantes pour l'avenir de la formation chirurgicale, en offrant des moyens plus sûrs, plus efficaces et plus interactifs d'acquérir des compétences chirurgicales. Les progrès réalisés dans l'intégration de ces outils soulignent le potentiel immense de l'innovation pour transformer l'éducation médicale et améliorer les standards de la pratique chirurgicale.

3 ————— 3
*LES LIMITES, LES DÉFIS,
LES CONSIDÉRATIONS
ETHIQUES ET LÉGALES*
3 ————— 3

L'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale offre des avantages significatifs, notamment en termes de précision diagnostique et d'optimisation des compétences chirurgicales. Cependant, ces technologies présentent également des limites importantes, soulevant des questions relatives aux défis légaux et éthiques.

1. Les Limites et les Défis :

1.1. Les Limites des Données Collectées :

Les données issues des procédures chirurgicales ne reflètent qu'une partie du problème global. Cela est principalement dû au fait qu'elles ne sont pas standardisées et consistent en des séries d'images statiques ou des vidéos.

Ces données manquent souvent de la richesse sémantique nécessaire pour une interprétation automatisée par les algorithmes d'IA. Par exemple, l'identification des gestes chirurgicaux spécifiques ou la reconnaissance des instruments ne peuvent pas être facilement déduites des images ou vidéos seules, nécessitant ainsi des annotations humaines. Cependant, l'annotation manuelle est non seulement chronophage, mais également sujette à des erreurs et à des incohérences. [204]

1.2. La Structure et le Stockage des Données :

Il existe parfois une infrastructure technique limitée pour l'acquisition, le stockage et l'accès aux données, car toutes les données collectées ne sont pas systématiquement enregistrées et stockées de manière permanente.

Cela s'explique par la haute résolution des images et vidéos générées dans les blocs opératoires, qui sont difficiles à stocker (et à récupérer). Le stockage dans le cloud devient de plus en plus courant grâce à l'expansion des solutions de stockage en ligne, telles que Amazon Web Services (AWS) et Microsoft Azure. [204]

1.3. La Capture des Données et Capteurs :

L'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale soulève plusieurs défis, en particulier durant la phase intra opératoire. La déformation des tissus, les limitations des dispositifs d'imagerie et les conditions variables du milieu opératoire rendent difficile la superposition précise des données anatomiques sur des structures organiques déformables.

L'écart entre les images préopératoires et la réalité observée pendant l'intervention réduit l'efficacité des données. Pour résoudre ces problèmes, les capteurs et les algorithmes utilisés doivent être améliorés afin de mieux s'adapter aux environnements dynamiques.

Cependant, l'implantation de capteurs sur les instruments chirurgicaux pose des défis logistiques, notamment les contraintes de taille et les difficultés liées à la stérilisation répétée, ce qui rend leur utilisation compliquée en pratique clinique. [204]

1.4. La Qualité Des Données :

La qualité des données demeure un problème critique. Les algorithmes d'IA nécessitent des ensembles de données de haute qualité, qui ne sont pas seulement annotés correctement, mais également exempts de biais. Les biais dans les données, tels que ceux résultant de l'inclusion disproportionnée de certains types de patients ou de procédures, peuvent affecter négativement la performance des algorithmes. [204]

1.5. Les Limites des algorithmes :

Les modèles d'apprentissage automatique souffrent souvent de leur incapacité à généraliser efficacement. Les algorithmes qui fonctionnent bien sur des ensembles de données d'entraînement spécifiques peuvent échouer lorsqu'ils sont appliqués à des données réelles ou dans des contextes cliniques différents. [204]

Les limites des données collectées, la complexité du stockage et de la gestion des informations, ainsi que les difficultés techniques liées à l'implantation des capteurs, représentent des obstacles importants. Par ailleurs, la qualité des données et la capacité des algorithmes à s'adapter à des contextes cliniques variés demeurent des enjeux cruciaux.

1.6. Les Limites des Robots Chirurgicaux :

Bien que la chirurgie robotique offre de nombreux avantages, elle présente également plusieurs défis et limitations qui doivent être pris en compte :

a. Les Coûts initiaux élevés :

L'un des principaux obstacles à l'adoption généralisée de la chirurgie robotique est le coût initial élevé des systèmes, pouvant atteindre jusqu'à 4 millions de dollars. À cela s'ajoutent des coûts d'entretien et d'exploitation récurrents associés à ces technologies avancées.

b. La Courbe d'apprentissage abrupte :

Les chirurgiens doivent suivre une formation approfondie pour maîtriser les techniques de chirurgie robotique. La courbe d'apprentissage peut être difficile, entraînant potentiellement des temps opératoires plus longs et un risque accru pendant les phases initiales.

c. Les Défaillances techniques :

Comme tout système technologique complexe, les systèmes de chirurgie robotique sont vulnérables aux défaillances ou dysfonctionnements techniques. Ces problèmes peuvent aller de simples anomalies à des pannes plus graves nécessitant l'interruption de la procédure.

d. Les Problèmes de sécurité :

Bien que la chirurgie robotique vise à améliorer les résultats pour les patients, des préoccupations de sécurité inhérentes à l'utilisation de technologies avancées en milieu chirurgical existent. Ces risques incluent des collisions d'instruments, des arcs électriques et des erreurs de système.

Pour surmonter ces défis, les hôpitaux doivent évaluer attentivement les coûts et les bénéfices de la mise en œuvre des programmes de chirurgie robotique. De plus, des programmes de formation solides, une stricte adhésion aux protocoles de sécurité et une maintenance régulière ainsi que des mises à jour des systèmes robotiques sont essentiels pour atténuer les risques et garantir l'utilisation sûre et efficace de cette technologie. [205]

1.7. Les compétences des chirurgiens :

La mécanisation des procédures et l'intégration de l'intelligence artificielle soulèvent des préoccupations concernant la perte de compétences chirurgicales traditionnelles. L'usage excessif de la technologie pourrait entraîner une dépendance, réduisant la capacité des chirurgiens à gérer des situations sans l'aide de l'IA.

En cas de dysfonctionnement du système, tel qu'une attaque informatique ou un problème technique, un chirurgien n'ayant pas maîtrisé les méthodes classiques pourrait aggraver les conditions du patient.

Alors que l'IA et les chirurgiens sont censés être capables de résoudre tous les problèmes, l'absence de formation aux techniques conventionnelles pourrait nuire à la prise de décision en situation d'urgence, notamment lorsque l'IA et le chirurgien sont en désaccord.

Dans ces contextes, l'expérience chirurgicale traditionnelle est essentielle pour maintenir la confiance du chirurgien et éviter une dépendance excessive à la technologie. Une diminution des compétences fondamentales chez le chirurgien, notamment l'examen physique, l'observation, la communication et la prise de décision lors de l'interaction avec le patient, mettant ainsi en péril la sécurité des patients.

De plus, les chirurgiens réalisent de moins en moins d'examens physiques en raison de l'utilisation accrue de technologies. Ainsi que les compétences en communication, essentielles pour évaluer et échanger des informations avec les patients, risquent également de se dégrader.[206]

En somme, bien que l'intelligence artificielle offre des avancées considérables en matière de précision, d'assistance et d'efficacité, elle ne saurait remplacer l'expertise humaine acquise par l'expérience clinique. Il est donc crucial de maintenir un équilibre entre l'innovation technologique et la préservation des compétences chirurgicales fondamentales, afin de garantir une pratique sécuritaire, autonome et résiliente face aux imprévus.

2. Les Considérations Ethiques et Légales :

2.1. Les Considérations Éthiques:

Les principales problématiques éthiques liées à l'application de l'intelligence artificielle en chirurgie, et en chirurgie viscérale en particulier, portent sur la transparence des algorithmes utilisés, la responsabilité en cas d'erreurs, la confidentialité et la gouvernance des données chirurgicales.

Il est également essentiel de veiller à la non-discrimination et l'équité dans l'accès aux innovations technologiques. Ainsi, le processus de consentement éclairé doit être perçu non seulement comme une exigence éthique, mais aussi comme une obligation légale, devant être respectée et appliquée dans la pratique chirurgicale. [207]

a. Transparence et explicabilité :

La transparence doit être assurée dans les données d'entraînement de l'IA, les algorithmes et les modèles intelligents afin de garantir la traçabilité et l'explicabilité. Les chirurgiens utilisant l'IA pour la prise de décisions doivent comprendre la performance actuelle des modèles, les données utilisées, et les motivations des algorithmes.

Avant d'intégrer un outil d'IA dans leur pratique, ils doivent s'assurer de sa pertinence pour leurs patients spécifiques.

De plus, la publication des protocoles utilisés pour annoter les données d'entraînement et de test pourrait favoriser la reproductibilité et contribuer à instaurer la confiance dans la performance de l'IA. [208]

b. Responsabilité et imputabilité :

Les questions éthiques et juridiques entourant l'utilisation de l'IA en chirurgie, et en chirurgie viscérale soulèvent des préoccupations sur la responsabilité en cas de décisions nuisibles pour le patient. Si l'IA est utilisée pour prendre une décision qui conduit à des erreurs,

La responsabilité devrait-elle incomber uniquement au chirurgien ayant validé la décision, ou aussi aux créateurs de l'IA, voire à d'autres acteurs comme ceux chargés de la maintenance ou les propriétaires des données ?

Il est crucial d'établir des mécanismes de responsabilité clairs et des régulations pour garantir la responsabilité des utilisateurs de l'IA à chaque étape de son développement, déploiement et utilisation.

De nouvelles législations sont nécessaires pour déterminer qui doit être tenu responsable des résultats chirurgicaux, qu'il s'agisse du chirurgien, du fabricant, ou d'autres parties prenantes.[208] [209]

c. Consentement éclairé :

Le consentement éclairé constitue une valeur éthique clé en santé, ce qui en fait un élément crucial lorsque l'IA est impliquée en chirurgie viscérale. Les patients doivent être correctement informés des avantages potentiels, des risques et des limites de l'utilisation des technologies d'IA dans leurs soins chirurgicaux.

Les chirurgiens doivent expliquer le rôle de l'IA, son impact possible sur leur décisions thérapeutiques, ainsi que les considérations liées à la confidentialité. Obtenir un consentement éclairé favorise une prise de décision collaborative, protège l'autonomie des patients et renforce la confiance entre ces derniers et les chirurgiens. [210]

d. La relation chirurgien-patient :

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la pratique chirurgicale est susceptible d'altérer la dynamique de la relation chirurgien-patient. Certains patients pourraient interpréter les recommandations algorithmiques comme une substitution partielle ou totale à l'expertise décisionnelle du chirurgien.

Il est donc impératif de souligner que l'IA constitue un adjuvant à la prise de décision chirurgicale, visant à affiner les stratégies thérapeutiques et non à se substituer au jugement humain. Une communication claire et exhaustive avec le patient est essentielle pour lever les ambiguïtés, expliciter le rôle de l'IA en tant qu'outil de soutien, et maintenir l'intégrité de l'alliance thérapeutique. [210]

e. Confidentialité et sécurité des données :

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la prise en charge chirurgicale repose sur la collecte, l'archivage et l'analyse de vastes volumes de données patients, comprenant notamment les dossiers médicaux, les données d'imagerie et les informations de surveillance en temps réel. Cette approche soulève des considérations éthiques majeures, telles que la préservation de la confidentialité des patients et l'assurance de la sécurité des données. [210]

La confidentialité des données soulève plusieurs considérations éthiques, telles que la nécessité d'obtenir un consentement explicite des patients pour l'utilisation de leurs données, ainsi que des accords d'utilisation de celles-ci avec les fournisseurs.

Protéger cette confidentialité est essentiel pour prévenir la discrimination, préserver la santé mentale, maintenir la confiance et éviter tout préjudice. Des solutions telles que les réglementations, les technologies avancées du blockchain et les mesures de cybersécurité sont indispensables. Bien que le partage de données puisse favoriser la recherche, l'interopérabilité et l'équité, il doit être soigneusement équilibré avec les risques pour la confidentialité. [211]

f. L'équité, diversité et non-discrimination :

L'équité dans les soins chirurgicaux fait référence à une répartition juste et équitable des ressources et des services de santé, garantissant à chacun, indépendamment de son niveau socio-économique ou de ses caractéristiques démographiques, une égalité d'accès aux soins chirurgicaux nécessaires. [210]

Le concept d'équité algorithmique est apparu comme une préoccupation majeure pour garantir que ces technologies fonctionnent de manière équitable et ne perpétuent ni n'aggravent les inégalités existantes. [212]

Le risque de discrimination et de traitement inéquitable provient d'une cause majeure : biais des données. [213]

g. Les Biais des données :

Il est essentiel de garantir la qualité des données intégrées dans les algorithmes d'IA afin d'éviter les biais susceptibles de fausser les conclusions et de ne pas refléter adéquatement la diversité des populations de patients.

Le terme "biaisé" fait référence à un préjugé injuste, généralement influencé par des biais sociaux répandus.

Il existe deux types principaux de biais dans l'IA :

✓ **Biais des données :**

Lorsque les algorithmes d'IA sont formés à partir de données insuffisantes ou mal structurées, cela peut entraîner des décisions inexactes ou non éthiques. Les biais dans les jeux de données peuvent refléter des préjugés ou des hypothèses erronées, affectant ainsi la fiabilité des résultats.

✓ Biais humain :

Nos propres normes et attentes sociales peuvent influencer l'interprétation des données, introduisant des biais dans les modèles. Bien que l'IA puisse parfois amplifier ces biais humains, elle peut aussi rendre les décisions plus équitables si elle est correctement formée pour éviter ces biais.

Pour lutter contre ces biais, il est important de diversifier les ensembles de données, de prendre conscience des biais sociaux existants, et de les atténuer dans le développement des outils d'IA. [214]

La transparence des algorithmes, la protection de la confidentialité des données et la prise en compte des biais sous-jacents sont des aspects essentiels dans le développement et l'application de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale.

Par ailleurs, la relation entre le chirurgien et le patient doit rester une priorité, car l'IA, bien qu'efficace, doit être utilisée comme un outil complémentaire à la pratique chirurgicale.

Une gouvernance appropriée, un cadre éthique solide et une législation en évolution sont nécessaires pour encadrer l'intégration de l'IA dans ce domaine spécifique et en assurer une utilisation conforme aux principes de sécurité, d'éthique et d'équité.

2.2. Les Considérations Règlementaires et Légales :

L'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale nécessite une approche réfléchie reposant sur la création de protocoles solides en matière de gouvernance, de formation approfondie et de supervision continue.

Ces protocoles doivent non seulement encadrer l'utilisation de ces technologies novatrices, mais également s'assurer qu'elles respectent les valeurs éthiques fondamentales et répondent aux défis uniques de la chirurgie viscérale.

Dans cette perspective, la Recommandation de l'UNESCO sur l'éthique de l'intelligence artificielle, adoptée lors de sa Conférence générale en novembre 2021, marque un jalon essentiel dans la régulation mondiale de l'IA.

Ce texte est le premier instrument normatif international visant à encadrer l'IA d'un point de vue éthique. Il établit des principes fondamentaux qui guident le développement et l'application de l'IA dans une optique centrée sur l'humain, en vue de maximiser ses bénéfices tout en protégeant les droits et la dignité des individus.

Ce cadre propose des actions concrètes pour répondre aux défis éthiques de l'IA, en tenant compte des implications sociales, culturelles et économiques. Il incite les nations à intégrer leurs principes dans leurs politiques et à développer des stratégies de gouvernance adaptées, garantissant ainsi que l'IA soit utilisée de manière responsable, transparente et respectueuse des droits humains.[215]

Au niveau européen, depuis 2018, la Commission du Conseil de l'Europe examine l'intelligence artificielle de manière globale, avec l'objectif d'assurer un cadre éthique et juridique adéquat en lien avec les valeurs de l'article 2 du Traité sur l'Union européenne.

Dans cette perspective, la Commission européenne a également élaboré une Charte éthique pour l'utilisation de l'intelligence artificielle. Cette charte contient un ensemble de principes visant à répondre aux préoccupations éthiques liées à l'IA. [215] [216]

Ces principes mettent l'accent sur le respect de certaines valeurs fondamentales, notamment le principe de non-discrimination et le droit à la vie privée avec une attention particulière accordée à la sécurité et à la transparence. [215] [216]

Le règlement sur l'intelligence artificielle **AI Act**, publié en juillet 2024 au Journal officiel de l'Union européenne, marque ainsi un tournant majeur qui reflète l'ambition de l'UE de devenir la première région au monde à adopter une législation complète sur l'IA.

En effet, depuis avril 2021, les législateurs européens ont travaillé activement à l'élaboration d'un cadre juridique visant à encadrer le développement, la commercialisation et l'utilisation des systèmes d'intelligence artificielle. Ce règlement est entré en vigueur en août 2024, et sa pleine application est prévue pour août 2027.

Les objectifs de ce règlement reposent sur quatre principes fondamentaux : Garantir la sécurité des systèmes d'IA tout en protégeant les droits fondamentaux, encourager l'innovation et l'adoption de l'IA, créer un cadre juridique stable pour favoriser les investissements et l'innovation dans l'IA, gérer les risques spécifiques associés à l'IA. [217] [218]

Ce cadre est particulièrement pertinent pour le secteur de la santé en général. L'adoption croissante de ces technologies dans des domaines sensibles tels que la chirurgie viscérale nécessite un contrôle strict afin de garantir la sécurité et les droits des patients.

Le Maroc développe progressivement son cadre juridique afin de garantir l'intégrité et la performance des systèmes d'IA, tout en collaborant activement sur la scène internationale pour harmoniser ses pratiques avec les standards mondiaux.

Depuis novembre 2023, le Maroc a franchi un cap décisif dans l'intégration de l'intelligence artificielle sur le continent africain, en accueillant un Centre de catégorie II sous l'égide de l'UNESCO.

Ce centre symbolise l'engagement du Royaume à promouvoir le développement de l'IA, tant au niveau régional qu'international.

Au Maroc, un aspect primordial dans l'intégration de l'IA est celui de la protection des données personnelles, élément fondamental pour garantir une utilisation responsable et conforme de ces technologies. Le pays a déjà amorcé des démarches importantes pour encadrer ce domaine, en adoptant des législations ciblées sur la protection des données et la cybersécurité.

La loi n° 09-08, promulguée en 2009, définit un cadre strict pour la collecte, le traitement et le stockage des données personnelles, en garantissant la sécurité et la confidentialité des informations des citoyens. En complément, la loi 05-20 relative à la cybersécurité, introduite plus récemment, renforce la protection du cyberspace national et assure la sécurisation des données dans un environnement numérique en constante évolution.

La mise en œuvre de ces lois est assurée par la Commission Nationale de Contrôle de la Protection des Données à Caractère Personnel (CNDP), qui veille au respect des réglementations en vigueur et offre un recours aux citoyens en cas de violation de leurs droits.

Le Maroc bénéficie également d'un cadre institutionnel solide pour la gouvernance du cyberspace, soutenu par des organismes clés tels que la CNDP, la Direction Générale de la Sécurité des Systèmes d'Information (DGSSI) et l'Agence Nationale de Réglementation des Télécommunications (ANRT). [216]

Ces institutions jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre des normes de protection des données, contribuant ainsi à assurer la sécurité et la conformité légale des systèmes, notamment dans des secteurs sensibles tels que la chirurgie viscérale. Elles garantissent que l'introduction de l'IA respecte des principes éthiques, tout en facilitant son adoption de manière sécurisée et responsable. [216]

L'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale impose la nécessité de concevoir de nouveaux cadres juridiques et réglementaires adaptés.

Ces cadres doivent prioriser une utilisation responsable et éthique des technologies, tout en protégeant les droits des patients et en garantissant la confidentialité de leurs données.

L'élaboration de réglementations spécifiques, alignées sur les normes internationales, est essentielle pour répondre aux enjeux particuliers de ce domaine.

Par ailleurs, le renforcement des dispositifs de supervision et l'ajustement des politiques de cybersécurité s'avèrent cruciaux pour accompagner les avancées rapides des outils numériques ainsi qu'une collaboration étroite entre les autorités, les professionnels de santé et les instances internationales sera déterminante pour assurer une intégration sécurisée et optimisée de l'IA au service des patients.



*ACCEPTATION
ET ADOPTION
DE L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE*



L'adoption de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale suscite un intérêt croissant, mais soulève également des préoccupations liées à son intégration dans la pratique clinique et la formation des chirurgiens.

Plusieurs études ont exploré les perceptions des chirurgiens viscéralistes et des résidents à l'égard de l'IA, mettant en évidence à la fois les avantages potentiels et les défis associés à cette technologie émergente.

Une étude menée par **Voskens et al. en 2021** [219], a examiné les perceptions des chirurgiens néerlandais, y compris ceux spécialisés en chirurgie viscérale, sur l'intégration de l'IA dans leur pratique.

Parmi les 313 répondants, 57 % exerçaient en chirurgie viscérale et oncologique, ce qui en fait la sous-spécialité la plus représentée.

Bien que 82,7 % des participants n'aient pas encore utilisé l'IA dans leur pratique clinique, une proportion notable (40 %) a exprimé un intérêt pour la formation en IA, soulignant une ouverture à l'intégration de cette technologie.

Les chirurgiens viscéralistes ont identifié des domaines spécifiques où l'IA pourrait avoir un impact significatif, notamment dans la planification chirurgicale préopératoire (57,5%) et l'amélioration des capacités diagnostiques (61 %).

Toutefois, des préoccupations demeurent, notamment concernant la responsabilité en cas de complications (83,1 %) et la crainte de perdre en autonomie (46,6 %). La réticence à l'égard des interventions chirurgicales entièrement automatisées (78 %) souligne le besoin de préserver le rôle du chirurgien dans la prise de décision. [219]

Une autre étude, réalisée par **Ace St John et Laura Cooper** [220], a analysé les perceptions des résidents en chirurgie viscérale sur l'IA. Les résultats ont révélé que 24 % des participants considéraient l'IA comme utile pour le diagnostic, particulièrement pour l'analyse des images radiologiques et des données cliniques dans des cas complexes.

Une proportion de 12 % a souligné son utilité dans l'identification des structures anatomiques lors des interventions, tandis que 20 % ont reconnu son potentiel pour l'analyse prédictive des dossiers médicaux électroniques.

Toutefois, une majorité (77,4 %) a exprimé des inquiétudes quant à la délégation de décisions critiques à des systèmes automatisés, particulièrement dans des situations d'urgence.


Cependant, 70,97 % des répondants se sont montrés favorables à l'automatisation des tâches répétitives, comme la gestion administrative ou le suivi des paramètres cliniques. L'étude a également souligné que la familiarité des résidents avec l'IA influençait positivement leur perception de son intégration dans la pratique chirurgicale, suggérant ainsi l'importance d'une formation adaptée. [220]

Ces études révèlent une vision partagée parmi les chirurgiens viscéralistes : bien que l'IA soit perçue comme un outil potentiellement bénéfique pour améliorer la guidance chirurgicale et le diagnostic, des préoccupations majeures subsistent concernant la responsabilité, l'autonomie et la fiabilité des systèmes automatisés.


L'intérêt pour la formation en IA reflète également la nécessité de développer des programmes éducatifs adaptés pour permettre aux praticiens de tirer pleinement parti de cette technologie tout en garantissant une utilisation éthique et responsable.

Il n'existe pas d'étude spécifique au Maroc sur l'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale. Les recherches internationales, bien que récentes, ne reflètent pas le contexte marocain.

Il serait utile de mener des études nationales pour évaluer l'acceptabilité et les défis de l'IA en chirurgie viscérale dans notre pays.



CONCLUSION



L'intégration de l'intelligence artificielle dans la chirurgie viscérale marque un tournant significatif dans l'évolution des pratiques chirurgicales, offrant des perspectives innovantes pour l'amélioration de la précision diagnostique, de la planification des interventions et de la personnalisation des prises en charges en fonction des caractéristiques individuelles des patients.

En permettant des ajustements en temps réel, des prédictions fiables et des recommandations pertinentes tout au long du parcours de soin, l'IA optimise la gestion des pathologies viscérales. Elle facilite ainsi une approche plus précise et fluide de la chirurgie, avec une capacité accrue à anticiper les complications et à améliorer la rapidité et la sécurité des prises en charge postopératoires.

Cependant, bien que l'IA offre des capacités technologiques avancées, elle ne saurait se substituer à l'expertise clinique humaine. L'IA doit être considérée comme un outil complémentaire indispensable à l'intuition, à l'expérience et à la rigueur des chirurgiens, engendrant une synergie entre le savoir-faire traditionnel et les capacités technologiques. Il est crucial que les chirurgiens jouent un rôle central dans le processus d'adoption et d'intégration de ces technologies, en collaboration avec les data scientists et les ingénieurs, afin de garantir une utilisation optimale de l'IA et d'assurer un cadre éthique rigoureux pour sa mise en œuvre.

Dans le contexte spécifique du Maroc, l'intégration de l'IA en chirurgie viscérale représente à la fois un défi majeur et une opportunité stratégique. La réussite de cette transition repose sur une adaptation continue des infrastructures sanitaires, associée à une mise à jour des compétences des équipes chirurgicales. Il devient impératif d'investir dans la formation continue des nouveaux chirurgiens et dans la modernisation des équipements afin de maximiser les bénéfices de l'IA tout en tenant compte des spécificités locales du système de santé.

En conclusion, l'intégration de l'intelligence artificielle en chirurgie viscérale ne se limite pas à une innovation technologique, mais incarne une transformation profonde des pratiques chirurgicales.

Bien exploitée, elle pourrait non seulement améliorer les résultats cliniques, mais également ouvrir la voie à une nouvelle ère de la chirurgie.



RESUME



Résumé

L'intelligence artificielle (IA) connaît une croissance rapide et transforme de manière significative de nombreux domaines, y compris la chirurgie viscérale. Grâce aux algorithmes d'apprentissage profond (DL), l'IA permet d'équiper les systèmes informatiques de compétences analytiques et de raisonnement clinique similaires à celles des experts humains.

À travers une revue approfondie de la littérature, nous avons analysé l'impact de l'IA à chaque étape du parcours chirurgical. En phase préopératoire, l'IA permet une analyse plus précise des images médicales, facilitant ainsi la détection des lésions et l'élaboration d'un plan opératoire optimal. Pendant l'intervention, l'IA, associée à la robotique, optimise la dextérité du chirurgien, réduit les risques et améliore l'efficacité des techniques mini-invasives. De plus, la réalité augmentée et la navigation assistée par IA offrent un guidage en temps réel, renforçant la sécurité et la précision des gestes chirurgicaux. Enfin, en postopératoire, l'IA permet un suivi personnalisé du patient, grâce à l'analyse continue des données cliniques et biologiques, facilitant ainsi la détection précoce des complications et l'ajustement des traitements.

Cependant, plusieurs défis demeurent, notamment la fiabilité des algorithmes, la sécurisation des données et la nécessité d'une formation adéquate des chirurgiens. L'IA doit compléter l'expertise clinique sans la remplacer, et son intégration doit être réfléchie et encadrée afin de garantir une utilisation optimale et sécurisée.

L'avenir de la chirurgie viscérale repose sur une synergie entre innovation technologique et savoir-faire humain. À mesure que l'IA se développe, son adoption au Maroc deviendra inévitable.

Il est crucial d'anticiper ces évolutions, ce qui nécessitera, d'une part, une modernisation des infrastructures hospitalières, et, d'autre part, une formation continue des chirurgiens, ainsi que la mise en place de cadres réglementaires rigoureux pour en assurer une utilisation optimale et sécurisée.

En conciliant progrès technologique et exigences médicales, l'IA ouvre la voie à une chirurgie plus précise, plus sûre et mieux adaptée aux besoins spécifiques des patients.

Abstract

Artificial intelligence (AI) is experiencing rapid growth and is significantly transforming various fields, including visceral surgery. Leveraging deep learning (DL) algorithms, AI enables computational systems to acquire analytical and clinical reasoning capabilities akin to those of human experts.

Through a comprehensive literature review, we assessed the impact of AI at each stage of the surgical process. In the preoperative phase, AI facilitates more accurate medical image analysis, thereby enhancing lesion detection and enabling the development of an optimal surgical plan. During surgery, AI, in conjunction with robotics, augments the surgeon's dexterity, mitigates risks, and enhances the efficacy of minimally invasive techniques. Furthermore, augmented reality and AI-assisted navigation provide real-time guidance, thereby improving the safety and precision of surgical interventions. In the postoperative phase, AI enables personalized patient monitoring through continuous analysis of clinical and biological data, facilitating the early detection of complications and the adjustment of therapeutic strategies.

However, several challenges persist, including the reliability of algorithms, data security concerns, and the necessity for appropriate surgeon training. AI must complement clinical expertise rather than replace it, and its integration requires careful consideration and regulation to ensure its optimal and secure application.

The future of visceral surgery is predicated upon a synergistic relationship between technological innovation and human expertise. As AI continues to evolve, its adoption in Morocco will become increasingly imperative. This evolution necessitates, on one hand, the modernization of hospital infrastructures, and on the other hand, the continuous professional development of surgeons, alongside the establishment of robust regulatory frameworks to guarantee secure and effective implementation. By integrating technological advancements with medical standards, AI opens the path to a more precise, safer, and personalized surgical approach, customized to meet the unique needs of each patient.

ملخص

يشهد الذكاء الاصطناعي نمواً سريعاً محدثاً تحولاً كبيراً في العديد من المجالات، بما في ذلك مجال الجراحة الباطنية. باستخدام خوارزميات التعلم العميق، يعمل الذكاء الاصطناعي على تزويد أنظمة الحوسبة بمهارات تحليلية ومنطقية مشابهة لتلك التي يمتلكها الخبراء البشريون.

من خلال مراجعة شاملة للأدبيات، قمنا بتحليل تأثير الذكاء الاصطناعي في كل مرحلة من مراحل المسار الجراحي. في مرحلة ما قبل الجراحة، يتيح الذكاء الاصطناعي تحليلاً دقيقاً للصور الطبية، مما يسهل اكتشاف الآفات ووضع خطة جراحية مثالية. أثناء العملية، يعمل الذكاء الاصطناعي، بالتكامل مع الروبوتات، على تحسين مهارات الجراح وتقليل المخاطر وتحسين فعالية التقنيات الجراحية ذات التدخل المحدود. بالإضافة إلى ذلك، توفر تقنيات الواقع المعزز والملاحة المدعومة بالذكاء الاصطناعي إرشاداً في الوقت الفعلي، مما يعزز الأمان والدقة في الإجراءات الجراحية. أخيراً، في مرحلة ما بعد الجراحة، يتيح الذكاء الاصطناعي المراقبة الشخصية للمريض، وذلك بفضل التحليل المستمر للبيانات السريرية والبيولوجية، مما يسهل الكشف المبكر عن المضاعفات وتعديل العلاجات.

ومع ذلك، لا يزال هناك عدد من التحديات، بما في ذلك موثوقية الخوارزميات، وأمن البيانات، والحاجة إلى تدريب كافٍ للجراحين. يجب أن يكون الذكاء الاصطناعي مكماً للخبرة السريرية دون أن يحل محلها، ويجب أن يتم التفكير بعناية في تكامله والإشراف عليه لضمان استخدامه بأكثر الطرق أماناً.

يكن مستقبل الجراحة الباطنية في التكامل بين الابتكار التكنولوجي والخبرة البشرية. ومع تطور الذكاء الاصطناعي، سيصبح اعتماده في المغرب أمراً حتمياً. ومن الأهمية بمكان استباق هذه التطورات التي ستتطلب، من ناحية، تحديث البنية التحتية للمستشفيات، ومن ناحية أخرى، التدريب المستمر للجراحين، فضلاً عن إدخال أطر تنظيمية صارمة لضمان الاستخدام الأمثل والأمن.

من خلال التوفيق بين التقدم التكنولوجي والمتطلبات الطبية، يفتح الذكاء الاصطناعي الطريق أمام جراحة أكثر دقة وأماناً وتكيفاً مع الاحتياجات الخاصة للمرضى.



BIBLIOGRAPHIE



1. **Hamet P, Tremblay J.**
Artificial intelligence in medicine. *Metabolism* 2017;69:S36–40.
2. **Haenlein M, Kaplan A.**
A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence. *Calif. Manage. Rev.* 2019;61:5–14.
3. **Zhang EY, Cheok AD, Pan Z, Cai J, Yan Y.**
From Turing to Transformers: A Comprehensive Review and Tutorial on the Evolution and Applications of Generative Transformer Models. *Sci* 2023;5:46.
4. **Rebelo N, Sanders L, Li K, Chow JCL.**
Learning the Treatment Process in Radiotherapy Using an Artificial Intelligence–Assisted Chatbot: Development Study. *JMIR Form. Res.* 2022;6:e39443.
5. **Jean A.**
Une brève introduction à l'intelligence artificielle. *médecine/sciences* 2020;36:1059–67.
6. **Costa CJ, Aparicio M.**
Applications of Data Science and Artificial Intelligence. *Appl. Sci.* 2023;13:9015.
7. **Qammar A, Wang H, Ding J, Naouri A, Daneshmand M, Ning H.**
Chatbots to ChatGPT in a Cybersecurity Space: Evolution, Vulnerabilities, Attacks, Challenges, and Future Recommendations [Internet]. 2023 [cited 2024 Nov 29]; Available from: <http://arxiv.org/abs/2306.09255>
8. **Neha F, Bhati D.**
A Survey of DeepSeek Models [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 5]; Available from: <https://www.techrxiv.org/users/876974/articles/1265081-a-survey-of-deepseek-models?commit=7e682fe05bf0162f482aec18ef5e65311304c05b>
9. **Alowais SA, Alghamdi SS, Alsuhebany N, Alqahtani T, Alshaya AI, Almohareb SN, et al.**
Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC Med. Educ.* 2023;23:689.
10. **Dubois DM.**
Intelligence Naturelle et Intelligence Artificielle Natural Intelligence and Artificial intelligence.
11. **Sternberg RJ.**
Intelligence. *Dialogues Clin. Neurosci.* 2012;14:19–27.
12. **Al Kuwaiti A, Nazer K, Al-Reedy A, Al-Shehri S, Al-Muhanna A, Subbarayalu AV, et al.**
A Review of the Role of Artificial Intelligence in Healthcare. *J. Pers. Med.* 2023;13:951.

13. **Nagireddi JN, Vyas AK, Sanapati MR, Soin A, Manchikanti L.**
The Analysis of Pain Research through the Lens of Artificial Intelligence and Machine Learning. *Pain Physician* 2022;25:E211–43.
14. **Gratzer K, Servy H, Chiche L.**
Des guidelines pour l'intelligence artificielle ! *Rev. Médecine Interne* 2020;41:189–91.
15. **Mallappallil M, Sabu J, Gruessner A, Salifu M.**
A review of big data and medical research. *SAGE Open Med.* 2020;8:205031212093483.
16. **Dastres R, Soori M.**
Artificial Neural Network Systems. *Int. J. Imaging Robot. IJIR* 2021;21:13–25.
17. **Udaya Mohanan K, Cho S, Park BG.**
Optimization of the structural complexity of artificial neural network for hardware-driven neuromorphic computing application. *Appl. Intell.* 2023;53:6288–306.
18. **Chen M, Decary M.**
Artificial intelligence in healthcare: An essential guide for health leaders. *Healthc. Manage. Forum* 2020;33:10–8.
19. **Mintz Y, Brodie R.**
Introduction to artificial intelligence in medicine. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* 2019;28:73–81.
20. **Oka A, Ishimura N, Ishihara S.**
A New Dawn for the Use of Artificial Intelligence in Gastroenterology, Hepatology and Pancreatology. *Diagnostics* 2021;11:1719.
21. **Yamashita R, Nishio M, Do RKG, Togashi K.**
Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging* 2018;9:611–29.
22. **Ward TM, Mascagni P, Ban Y, Rosman G, Padoy N, Meireles O, et al.**
Computer vision in surgery. *Surgery* 2021;169:1253–6.
23. **Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, Kuleshov V, DePristo M, Chou K, et al.**
A guide to deep learning in healthcare. *Nat. Med.* 2019;25:24–9.
24. **Shen YT, Chen L, Yue WW, Xu HX.**
Artificial intelligence in ultrasound. *Eur. J. Radiol.* 2021;139:109717.
25. **Locke S, Bashall A, Al-Adely S, Moore J, Wilson A, Kitchen GB.**
Natural language processing in medicine: A review. *Trends Anaesth. Crit. Care* 2021;38:4–9.
26. **Allouch M, Azaria A, Azoulay R.**
Conversational Agents: Goals, Technologies, Vision and Challenges. *Sensors* 2021;21:8448.

27. **Sallam M.**
ChatGPT Utility in Healthcare Education, Research, and Practice: Systematic Review on the Promising Perspectives and Valid Concerns. *Healthcare* 2023;11:887.
28. **Safi Z, Abd-Alrazaq A, Khalifa M, Househ M.**
Technical Aspects of Developing Chatbots for Medical Applications: Scoping Review. *J. Med. Internet Res.* 2020;22:e19127.
29. **Chadebecq F, Vasconcelos F, Mazomenos E, Stoyanov D.**
Computer Vision in the Surgical Operating Room. *Visc. Med.* 2020;36:456-62.
30. **Guo K, Tao H, Zhu Y, Li B, Fang C, Qian Y, et al.**
Current applications of artificial intelligence-based computer vision in laparoscopic surgery. *Laparosc. Endosc. Robot. Surg.* 2023;6:91-6.
31. **Guo K, Tao H, Zhu Y, Li B, Fang C, Qian Y, et al.**
Current applications of artificial intelligence-based computer vision in laparoscopic surgery. *Laparosc. Endosc. Robot. Surg.* 2023;6:91-6.
32. **Morrell Alg, Morrell-Junior Ac, Morrell Ag, Mendes Jmf, Tustumi F, De-Oliveira-E-Silva Lg, Et Al.**
The history of robotic surgery and its evolution: when illusion becomes reality. *Rev. Colégio Bras. Cir.* 48:e20202798.
33. **Nawrat Z.**
Introduction to AI-driven surgical robots. *Artif. Intell. Surg.* 2023;3:90-7.
34. **Viscaino M, Torres Bustos J, Muñoz P, Auat Cheein C, Cheein FA.**
Artificial intelligence for the early detection of colorectal cancer: A comprehensive review of its advantages and misconceptions. *World J. Gastroenterol.* 2021;27:6399-414.
35. **Fang HSA, Tan TH, Tan YFC, Tan CJM.**
Blockchain Personal Health Records: Systematic Review. *J. Med. Internet Res.* 2021;23:e25094.
36. **Khezzr S, Moniruzzaman M, Yassine A, Benlamri R.**
Blockchain Technology in Healthcare: A Comprehensive Review and Directions for Future Research. *Appl. Sci.* 2019;9:1736.
37. **Müller M, Gloor B, Candinas D, Malinka T.**
The 100 Most-Cited Articles in Visceral Surgery: A Systematic Review. *Dig. Surg.* 2016;33:509-19.
38. **Răducan ID.**
The History of Abdominal Surgery: The Evolution of an Essential Branch of Medicine.

39. **Rajaretnam N, Okoye E, Burns B.**
Laparotomy [Internet]. In: StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Apr 22]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK525961/>
40. **Sehgal R.**
Laparotomy: Exploring the Surgical Technique, Indications, and Advancements.
41. **Kim SH, Kim YK.**
Upper midline incision for liver resection. *HPB* 2013;15:273–8.
42. **Tranchart H, Lainas P, Gaillard M, Voron T, Manceau G, Sabbagh C, et al.**
Laparoscopic surgery in 2018: indications, limits and contraindications. 2018;25.
43. **Godeau P, Couturier D, Ambroise–Thomas P, Aurengo A, Bousser MG, Dubois F, et al.**
Le diagnostic en médecine : histoire, mise en oeuvre présente, perspectives. *Bull. Académie Natl. Médecine* 2006;190:1533–49.
44. **Mehta N, Pandit A, Shukla S.**
Transforming healthcare with big data analytics and artificial intelligence: A systematic mapping study. *J. Biomed. Inform.* 2019;100:103311.
45. **Sutton RT, Pincock D, Baumgart DC, Sadowski DC, Fedorak RN, Kroeker KI.**
An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success. *Npj Digit. Med.* 2020;3:17.
46. **Kim SY, Kim DH, Kim MJ, Ko HJ, Jeong OR.**
XAI–Based Clinical Decision Support Systems: A Systematic Review. *Appl. Sci.* 2024;14:6638.
47. **Hong G, Smith M, Lin S.**
The AI Will See You Now: Feasibility and Acceptability of a Conversational AI Medical Interviewing System. *JMIR Form. Res.* 2022;6:e37028.
48. **Alqaidi SH, Albugami SM, Alzahrani WS, Badri S, Wali A.**
Network–integrated medical chatbot for enhanced healthcare services. *Telemat. Inform. Rep.* 2024;15:100153.
49. **Shum H yeung, He X dong, Li D.**
From Eliza to Xiaolce: challenges and opportunities with social chatbots. *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.* 2018;19:10–26.
50. **Ghosh S, Bhatia S, Bhatia A.**
Quro: Facilitating User Symptom Check Using a Personalised Chatbot–Oriented Dialogue System [Internet]. In: *Connecting the System to Enhance the Practitioner and Consumer Experience in Healthcare*. IOS Press; 2018 [cited 2024 Oct 28]. page 51–6. Available from: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/978-1-61499-890-7-51>

51. **Xu L, Sanders L, Li K, Chow JCL.**
Chatbot for Health Care and Oncology Applications Using Artificial Intelligence and Machine Learning: Systematic Review. *JMIR Cancer* 2021;7:e27850.
52. **Morse KE, Ostberg NP, Jones VG, Chan AS.**
Use Characteristics and Triage Acuity of a Digital Symptom Checker in a Large Integrated Health System: Population-Based Descriptive Study. *J. Med. Internet Res.* 2020;22:e20549.
53. **Khadija A, Zahra FF, Naceur A.**
AI-Powered Health Chatbots: Toward a general architecture. *Procedia Comput. Sci.* 2021;191:355-60.
54. **Zhang S, Song J.**
A chatbot based question and answer system for the auxiliary diagnosis of chronic diseases based on large language model. *Sci. Rep.* 2024;14:17118.
55. **Mazurowski MA, Buda M, Saha A, Bashir MR.**
Deep learning in radiology: An overview of the concepts and a survey of the state of the art with focus on MRI. *J. Magn. Reson. Imaging* 2019;49:939-54.
56. **Moawad AW, Fuentes DT, ElBanan MG, Shalaby AS, Guccione J, Kamel S, et al.**
Artificial Intelligence in Diagnostic Radiology: Where Do We Stand, Challenges, and Opportunities. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2022;46:78-90.
57. **Hsiao YJ, Wen YC, Lai WY, Lin YY, Yang YP, Chien Y, et al.**
Application of artificial intelligence-driven endoscopic screening and diagnosis of gastric cancer. *World J. Gastroenterol.* 2021;27:2979-93.
58. **Adams SJ, Henderson RDE, Yi X, Babyn P.**
Artificial Intelligence Solutions for Analysis of X-ray Images. *Can. Assoc. Radiol. J.* 2021;72:60-72.
59. **Anderson PG, Tarder-Stoll H, Alpaslan M, Keathley N, Levin DL, Venkatesh S, et al.**
Deep learning improves physician accuracy in the comprehensive detection of abnormalities on chest X-rays. *Sci. Rep.* 2024;14:25151.
60. **Rajpurkar P, Irvin J, Ball RL, Zhu K, Yang B, Mehta H, et al.**
Deep learning for chest radiograph diagnosis: A retrospective comparison of the CheXNeXt algorithm to practicing radiologists. *PLOS Med.* 2018;15:e1002686.
61. **Kim D, Wit H, Thurston M, Long M, Maskell G, Strugnell M, et al.**
An artificial intelligence deep learning model for identification of small bowel obstruction on plain abdominal radiographs. *Br. J. Radiol.* 2021;94:20201407.

62. **Park S, Ye JC, Lee ES, Cho G, Yoon JW, Choi JH, et al.**
Deep Learning–Enabled Detection of Pneumoperitoneum in Supine and Erect Abdominal Radiography: Modeling Using Transfer Learning and Semi–Supervised Learning. *Korean J. Radiol.* 2023;24:541.
63. **Edwards EA, Pigg N, Courtier J, Zapala MA, MacKenzie JD, Phelps AS.**
Intussusception: past, present and future. *Pediatr. Radiol.* 2017;47:1101–8.
64. **Kim S, Yoon H, Lee MJ, Kim MJ, Han K, Yoon JK, et al.**
Performance of deep learning–based algorithm for detection of ileocolic intussusception on abdominal radiographs of young children. *Sci. Rep.* 2019;9:19420.
65. **Shen YT, Chen L, Yue WW, Xu HX.**
Artificial intelligence in ultrasound. *Eur. J. Radiol.* 2021;139:109717.
66. **Tiyarattanachai T, Apiparakoon T, Marukat S, Sukcharoen S, Geratikornsupuk N, Anukularnkusol N, et al.**
Development and validation of artificial intelligence to detect and diagnose liver lesions from ultrasound images. *PloS One* 2021;16:e0252882.
67. **Hayashi K, Ishimaru T, Lee J, Hirai S, Ooke T, Hosokawa T, et al.**
Identification of Appendicitis Using Ultrasound with the Aid of Machine Learning. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* 2021;31:1412–9.
68. **Hameed BS, Krishnan UM.**
Artificial Intelligence–Driven Diagnosis of Pancreatic Cancer. *Cancers* 2022;14:5382.
69. **Chen PT, Wu T, Wang P, Chang D, Liu KL, Wu MS, et al.**
Pancreatic Cancer Detection on CT Scans with Deep Learning: A Nationwide Population–based Study. *Radiology* 2023;306:172–82.
70. **Farzaneh N, Stein EB, Soroushmehr R, Gryak J, Najarian K.**
A deep learning framework for automated detection and quantitative assessment of liver trauma. *BMC Med. Imaging* 2022;22:39.
71. **Park YJ, Cho HS, Kim MN.**
AI Model for Detection of Abdominal Hemorrhage Lesions in Abdominal CT Images. *Bioengineering* 2023;10:502.
72. **Brejneboel MW, Nielsen YW, Taubmann O, Eibenberger E, Müller FC.**
Artificial Intelligence based detection of pneumoperitoneum on CT scans in patients presenting with acute abdominal pain: A clinical diagnostic test accuracy study. *Eur. J. Radiol.* 2022;150:110216.

- 73. Kim J, Min JH, Kim SK, Shin SY, Lee MW.**
Detection of Hepatocellular Carcinoma in Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging Using Deep Learning Classifier: A Multi-Center Retrospective Study. *Sci. Rep.* 2020;10:9458.
- 74. Hamabe A, Ishii M, Kamoda R, Sasuga S, Okuya K, Okita K, et al.**
Artificial intelligence-based technology for semi-automated segmentation of rectal cancer using high-resolution MRI. *PLoS One* 2022;17:e0269931.
- 75. Ali H, Sharif M, Yasmin M, Rehmani MH, Riaz F.**
A survey of feature extraction and fusion of deep learning for detection of abnormalities in video endoscopy of gastrointestinal-tract. *Artif. Intell. Rev.* 2020;53:2635-707.
- 76. Rees CJ, Koo S.**
Artificial intelligence — upping the game in gastrointestinal endoscopy? *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* 2019;16:584-5.
- 77. Kim JH, Nam SJ, Park SC.**
Usefulness of artificial intelligence in gastric neoplasms. *World J. Gastroenterol.* 2021;27:3543-55.
- 78. Mori Y, Kudo S, Mohamed HEN, Misawa M, Ogata N, Itoh H, et al.**
Artificial intelligence and upper gastrointestinal endoscopy: Current status and future perspective. *Dig. Endosc.* 2019;31:378-88.
- 79. Fockens KN, Jukema JB, Boers T, Jong MR, Van Der Putten JA, Pouw RE, et al.**
Towards a robust and compact deep learning system for primary detection of early Barrett's neoplasia: Initial image-based results of training on a multi-center retrospectively collected data set. *United Eur. Gastroenterol. J.* 2023;11:324-36.
- 80. Yang XX, Li Z, Shao XJ, Ji R, Qu JY, Zheng MQ, et al.**
Real-time artificial intelligence for endoscopic diagnosis of early esophageal squamous cell cancer (with video). *Dig. Endosc. Off. J. Jpn. Gastroenterol. Endosc. Soc.* 2021;33:1075-84.
- 81. Sano T, Coit DG, Kim HH, Roviello F, Kassab P, Wittekind C, et al.**
Proposal of a new stage grouping of gastric cancer for TNM classification: International Gastric Cancer Association staging project. *Gastric Cancer Off. J. Int. Gastric Cancer Assoc. Jpn. Gastric Cancer Assoc.* 2017;20:217-25.
- 82. Tang D, Zhou J, Wang L, Ni M, Chen M, Hassan S, et al.**
A Novel Model Based on Deep Convolutional Neural Network Improves Diagnostic Accuracy of Intramucosal Gastric Cancer (With Video). *Front. Oncol.* 2021;11:622827.
- 83. Hirasawa T, Aoyama K, Tanimoto T, Ishihara S, Shichijo S, Ozawa T, et al.**
Application of artificial intelligence using a convolutional neural network for detecting gastric cancer in endoscopic images. *Gastric Cancer* 2018;21:653-60.

- 84. Taghiakbari M, Mori Y, Von Renteln D.**
Artificial intelligence–assisted colonoscopy: A review of current state of practice and research. *World J. Gastroenterol.* 2021;27:8103–22.
- 85. Kudo S ei, Misawa M, Mori Y, Hotta K, Ohtsuka K, Ikematsu H, et al.**
Artificial Intelligence–assisted System Improves Endoscopic Identification of Colorectal Neoplasms. *Clin. Gastroenterol. Hepatol.* 2020;18:1874–1881.e2.
- 86. Kamitani Y, Nonaka K, Isomoto H.**
Current Status and Future Perspectives of Artificial Intelligence in Colonoscopy. *J. Clin. Med.* 2022;11:2923.
- 87. Yoshida N, Inoue K, Tomita Y, Kobayashi R, Hashimoto H, Sugino S, et al.**
An analysis about the function of a new artificial intelligence, CAD EYE with the lesion recognition and diagnosis for colorectal polyps in clinical practice. *Int. J. Colorectal Dis.* 2021;36:2237–45.
- 88. Morales S, Engan K, Naranjo V.**
Artificial intelligence in computational pathology – challenges and future directions. *Digit. Signal Process.* 2021;119:103196.
- 89. Ba W, Wang S, Shang M, Zhang Z, Wu H, Yu C, et al.**
Assessment of deep learning assistance for the pathological diagnosis of gastric cancer. *Mod. Pathol. Off. J. U. S. Can. Acad. Pathol. Inc* 2022;35:1262–8.
- 90. Choi S, Kim S.**
Artificial Intelligence in the Pathology of Gastric Cancer. *J. Gastric Cancer* 2023;23:410.
- 91. Park J, Jang BG, Kim YW, Park H, Kim B hui, Kim MJ, et al.**
A Prospective Validation and Observer Performance Study of a Deep Learning Algorithm for Pathologic Diagnosis of Gastric Tumors in Endoscopic Biopsies. *Clin. Cancer Res.* 2021;27:719–28.
- 92. Song Z, Zou S, Zhou W, Huang Y, Shao L, Yuan J, et al.**
Clinically applicable histopathological diagnosis system for gastric cancer detection using deep learning. *Nat. Commun.* 2020;11:4294.
- 93. Liao H, Long Y, Han R, Wang W, Xu L, Liao M, et al.**
Deep learning-based classification and mutation prediction from histopathological images of hepatocellular carcinoma. *Clin. Transl. Med.* 2020;10:e102.
- 94. Kiani A, Uyumazturk B, Rajpurkar P, Wang A, Gao R, Jones E, et al.**
Impact of a deep learning assistant on the histopathologic classification of liver cancer. *Npj Digit. Med.* 2020;3:23.

- 95. Ho C, Zhao Z, Chen XF, Sauer J, Saraf SA, Jialdasani R, et al.**
A promising deep learning–assistive algorithm for histopathological screening of colorectal cancer. *Sci. Rep.* 2022;12:2222.
- 96. Gasparin AT, Araujo CIF, Schmitt P, Cardoso MR, Perussolo MC, De Jesus TCS, et al.**
Hilab system, a new point-of-care hematology analyzer supported by the Internet of Things and Artificial Intelligence. *Sci. Rep.* 2022;12:10409.
- 97. Males I, Boban Z, Kumric M, Vrdoljak J, Berkovic K, Pogorelic Z, et al.**
Applying an explainable machine learning model might reduce the number of negative appendectomies in pediatric patients with a high probability of acute appendicitis. *Sci. Rep.* 2024;14:12772.
- 98. Cheng B, Zhou P, Chen Y.**
Machine–learning algorithms based on personalized pathways for a novel predictive model for the diagnosis of hepatocellular carcinoma. *BMC Bioinformatics* 2022;23:248.
- 99. Rimmer L, Howard C, Picca L, Bashir M.**
The automaton as a surgeon: the future of artificial intelligence in emergency and general surgery. *Eur. J. Trauma Emerg. Surg.* 2021;47:757–62.
- 100. Bihorac A, Ozrazgat–Baslanti T, Ebadi A, Motaei A, Madkour M, Pardalos PM, et al.**
MySurgeryRisk: Development and Validation of a Machine–learning Risk Algorithm for Major Complications and Death After Surgery. *Ann. Surg.* 2019;269:652–62.
- 101. Ribeiro Junior MAF, Smaniotto R, Gebran A, Zamudio JP, Mohseni S, Rodrigues JMDS, et al.**
The use of POTTER (Predictive Optimal Trees in Emergency Surgery Risk) calculator to predict mortality and complications in patients submitted to Emergency Surgery. *Rev. Colégio Bras. Cir.* 2023;50:e20233624.
- 102. Wang Y, Ji C, Wang Y, Ji M, Yang JJ, Zhou CM.**
Predicting postoperative liver cancer death outcomes with machine learning. *Curr. Med. Res. Opin.* 2021;37:629–34.
- 103. Lan L, Guo Q, Zhang Z, Zhao W, Yang X, Lu H, et al.**
Classification of Infected Necrotizing Pancreatitis for Surgery Within or Beyond 4 Weeks Using Machine Learning. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020;8:541.
- 104. Riahi V, Hassanzadeh H, Khanna S, Boyle J, Syed F, Biki B, et al.**
Improving preoperative prediction of surgery duration. *BMC Health Serv. Res.* 2023;23:1343.
- 105. Martinez O, Martinez C, Parra CA, Rugeles S, Suarez DR.**
Machine learning for surgical time prediction. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2021;208:106220.

- 106. Park JJ, Tiefenbach J, Demetriades AK.**
The role of artificial intelligence in surgical simulation. *Front. Med. Technol.* 2022;4:1076755.
- 107. Queisner M, Eisenträger K.**
Surgical planning in virtual reality: a systematic review. *J. Med. Imaging* 2024;11:062603.
- 108. Gupta D, Hassanien AE, Khanna A, editors.**
Advanced Computational Intelligence Techniques for Virtual Reality in Healthcare [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2020 [cited 2024 Nov 18]. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-35252-3>
- 109. Hameed BMZ, Somani S, Keller EX, Balamanigandan R, Mahapatra S, Pietropaolo A, et al.**
Application of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality in Endourology and Urolithiasis: An Update by YAU Endourology and Urolithiasis Working Group. *Front. Surg.* 2022;9:866946.
- 110. Ren Z, Fu X, Dong K, Lai Y, Zhang J.**
Advanced Study of Optical Imaging Systems for Virtual Reality Head-Mounted Displays. *Photonics* 2023;10:555.
- 111. Guerrero DT, Asaad M, Rajesh A, Hassan A, Butler CE.**
Advancing Surgical Education: The Use of Artificial Intelligence in Surgical Training. *Am. Surg.* 2023;89:49-54.
- 112. Naito S, Kajiwara M, Nakashima R, Sasaki T, Hasegawa S.**
Application of Extended Reality (Virtual Reality and Mixed Reality) Technology in Laparoscopic Liver Resections. *Cureus* [Internet] 2023 [cited 2024 Nov 18]; Available from: <https://www.cureus.com/articles/186206-application-of-extended-reality-virtual-reality-and-mixed-reality-technology-in-laparoscopic-liver-resections>
- 113. Kenngott HG, Pfeiffer M, Preukschas AA, Bettscheider L, Wise PA, Wagner M, et al.**
IMHOTEP: cross-professional evaluation of a three-dimensional virtual reality system for interactive surgical operation planning, tumor board discussion and immersive training for complex liver surgery in a head-mounted display. *Surg. Endosc.* 2022;36:126-34.
- 114. Chheang V, Saalfeld P, Joeres F, Boedecker C, Huber T, Huettl F, et al.**
A collaborative virtual reality environment for liver surgery planning. *Comput. Graph.* 2021;99:234-46.
- 115. Pfeiffer M, Kenngott H, Preukschas A, Huber M, Bettscheider L, Müller-Stich B, et al.**
IMHOTEP: virtual reality framework for surgical applications. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2018;13:741-8.

- 116. Dennler C, Bauer DE, Scheibler AG, Spirig J, Götschi T, Fürnstahl P, et al.**
Augmented reality in the operating room: a clinical feasibility study. *BMC Musculoskelet. Disord.* 2021;22:451.
- 117. Bracale U, Iacone B, Tedesco A, Gargiulo A, Di Nuzzo MM, Sannino D, et al.**
The use of mixed reality in the preoperative planning of colorectal surgery: Preliminary experience with a narrative review. *Cir. Esp. Engl. Ed.* 2024;102:S36-44.
- 118. Habermann AC, Timmerman WR, Cohen SM, Burkhardt BW, Amendola MF.**
Clinical applications of 3D printing in colorectal surgery: A systematic review. *Int. J. Colorectal Dis.* 2024;39:127.
- 119. Arsenkov S, Plavevski O, Nikolovski A, Arsenkov L, Shurlani A, Saliu V.**
Enhancing surgical planning of distal splenopancreatectomy through 3D printed models: a case report. *J. Surg. Case Rep.* 2023;2023:rjad528.
- 120. Luzon JA, Andersen BT, Stimec BV, Fasel JHD, Bakka AO, Kazaryan AM, et al.**
Implementation of 3D printed superior mesenteric vascular models for surgical planning and/or navigation in right colectomy with extended D3 mesenterectomy: comparison of virtual and physical models to the anatomy found at surgery. *Surg. Endosc.* 2019;33:567-75.
- 121. Alexander JC, Romito BT, Çobanoğlu MC.**
The present and future role of artificial intelligence and machine learning in anesthesiology. *Int. Anesthesiol. Clin.* 2020;58:7-16.
- 122. Kambale M, Jadhav S.**
Applications of artificial intelligence in anesthesia: A systematic review. *Saudi J. Anaesth.* 2024;18:249-56.
- 123. Kang AR, Lee J, Jung W, Lee M, Park SY, Woo J, et al.**
Development of a prediction model for hypotension after induction of anesthesia using machine learning. *PLoS ONE* 2020;15:e0231172.
- 124. Chen J, Ren W, Liu J, Fu Z, Yao Y, Chen X, et al.**
Feasibility of intelligent drug control in the maintenance phase of general anesthesia based on convolutional neural network. *Heliyon* 2023;9:e12481.
- 125. Zhan J, Wu Z xi, Duan Z xin, Yang G ying, Du Z yong, Bao X hang, et al.**
Heart rate variability-derived features based on deep neural network for distinguishing different anaesthesia states. *BMC Anesthesiol.* 2021;21:66.

- 126. Fairag M, Almahdi RH, Siddiqi AA, Alharthi FK, Alqurashi BS, Alzahrani NG, et al.**
Robotic Revolution in Surgery: Diverse Applications Across Specialties and Future Prospects Review Article. *Cureus* [Internet] 2024 [cited 2024 Nov 22]; Available from: <https://www.cureus.com/articles/217847-robotic-revolution-in-surgery-diverse-applications-across-specialties-and-future-prospects-review-article>
- 127. Iftikhar M, Saqib M, Zareen M, Mumtaz H.**
Artificial intelligence: revolutionizing robotic surgery: review. *Ann. Med. Surg.* 2024;86:5401-9.
- 128. Cepolina F, Razzoli RP.**
An introductory review of robotically assisted surgical systems. *Int. J. Med. Robot.* 2022;18:e2409.
- 129. Kim HL, Schulam P.**
The PAKY, HERMES, AESOP, ZEUS, and da Vinci robotic systems. *Urol. Clin. North Am.* 2004;31:659-69.
- 130. Knudsen JE, Ghaffar U, Ma R, Hung AJ.**
Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery. *J. Robot. Surg.* 2024;18:102.
- 131. Jung M, Morel P, Buehler L, Buchs NC, Hagen ME.**
Robotic general surgery: current practice, evidence, and perspective. *Langenbecks Arch. Surg.* 2015;400:283-92.
- 132. Asadizeidabadi A, Hosseini S, Vetshev F, Osminin S, Hosseini S.**
Comparison of da Vinci 5 with previous versions of da Vinci and Sina: A review. *Laparosc. Endosc. Robot. Surg.* 2024;7:60-5.
- 133. Moschovas MC, Bhat S, Sandri M, Rogers T, Onol F, Mazzone E, et al.**
Comparing the Approach to Radical Prostatectomy Using the Multiport da Vinci Xi and da Vinci SP Robots: A Propensity Score Analysis of Perioperative Outcomes. *Eur. Urol.* 2021;79:393-404.
- 134. Meet the New Da Vinci 5 Robotic Surgical System | Intuitive** [Internet]. [cited 2024 Nov 26]; Available from: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/5>
- 135. Fang C, Zhang L, Liang H, Xin Y, Zheng W, Ma J.**
Surgical technique of da Vinci robotic-assisted minimally invasive esophagectomy(RAMIE) expert experiences. *Intell. Surg.* 2024;7:12-20.
- 136. Sun M, Li W, Zhang C, Li S, Zhou F, Zhu Y, et al.**
Da Vinci Xi™ robot-assisted liver resection. *Intell. Surg.* 2022;1:16-20.

- 137. Zhao Z, Huang Y, Zhang X, Zhao H, Yuan X, Zhao Q, et al.**
Da Vinci robot-assisted resection to treat abdominal ectopic thyroid: a case report and literature review. *Gland Surg.* 2021;10:378–85.
- 138. Conrad PV, Mehdorn AS, Alkatout I, Becker T, Beckmann JH, Pochhammer J.**
The Combination of Laparoscopic and Robotic Surgery: First Experience with the Dexter Robotic System™ in Visceral Surgery. *Life* 2024;14:874.
- 139. Sarin A, Samreen S, Moffett JM, Inga-Zapata E, Bianco F, Alkhamesi NA, et al.**
Upcoming multi-visceral robotic surgery systems: a SAGES review. *Surg. Endosc.* [Internet] 2024 [cited 2024 Nov 23]; Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s00464-024-11384-8>
- 140. Tomihara K, Ide T, Ito K, Tanaka T, Noshiro H.**
Robotic spleen-preserving distal pancreatectomy using the first domestic surgical robot platform (the hinotori™ Surgical Robot System): a case report. *Surg. Case Rep.* 2024;10:22.
- 141. Picozzi P, Nocco U, Labate C, Gambini I, Puleo G, Silvi F, et al.**
Advances in Robotic Surgery: A Review of New Surgical Platforms. *Electronics* 2024;13:4675.
- 142. Patel V, Dohler M, Marescaux J, Saikali S, Gamal A, Reddy S, et al.**
Expanding Surgical Frontiers Across the Pacific Ocean: Insights from the First Telesurgery Procedures Connecting Orlando with Shanghai in Animal Models. *Eur. Urol. Open Sci.* 2024;70:70–8.
- 143. Guo H, Tian Y, Shi J, Yang P, Yang J, Ding P, et al.**
Pioneering case: Robot-assisted remote radical distal gastrectomy for gastric cancer based on 5G communication technology. *Intell. Surg.* 2024;7:22–6.
- 144. Lim JH, Lee WJ, Choi SH, Kang CM.**
Cholecystectomy using the Revo-i robotic surgical system from Korea: the first clinical study. *Updat. Surg.* 2021;73:1029–35.
- 145. El Anzaoui J, Mrabti M, Elbahri A, Alami M, Ameer A.**
Morocco, a New Era of Robotic Surgery. *Société Int. D'Urologie J.* 2024;5:371–3.
- 146. Zhang W, Li H, Cui L, Li H, Zhang X, Fang S, et al.**
Research progress and development trend of surgical robot and surgical instrument arm. *Int. J. Med. Robot.* 2021;17:e2309.
- 147. Oberlin J, Buharin VE, Dehghani H, Kim PCW.**
Intelligence and Autonomy in Future Robotic Surgery [Internet]. In: Gharagozloo F, Patel VR, Giulianotti PC, Poston R, Gruessner R, Meyer M, editors. *Robotic Surgery*. Cham: Springer International Publishing; 2021 [cited 2024 Nov 23]. page 183–95. Available from: https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-53594-0_18

- 148. Rao P, Peyron Q, Lilge S, Burgner-Kahrs J.**
How to Model Tendon-Driven Continuum Robots and Benchmark Modelling Performance. *Front. Robot. AI* 2021;7:630245.
- 149. Yung KL, Cheung JLK, Chung SW, Singh S, Yeung CK.**
A Single-Port Robotic Platform for Laparoscopic Surgery with a Large Central Channel for Additional Instrument. *Ann. Biomed. Eng.* 2017;45:2211-21.
- 150. Rivero-Moreno Y, Rodriguez M, Losada-Muñoz P, Redden S, Lopez-Lezama S, Vidal-Gallardo A, et al.**
Autonomous Robotic Surgery: Has the Future Arrived? *Cureus* 16:e52243.
- 151. Morris MX, Fiocco D, Caneva T, Yiapanis P, Orgill DP.**
Current and future applications of artificial intelligence in surgery: implications for clinical practice and research. *Front. Surg.* 2024;11:1393898.
- 152. Sasaki K, Ito M, Kobayashi S, Kitaguchi D, Matsuzaki H, Kudo M, et al.**
Automated surgical workflow identification by artificial intelligence in laparoscopic hepatectomy: Experimental research. *Int. J. Surg.* 2022;105:106856.
- 153. Cheng K, You J, Wu S, Chen Z, Zhou Z, Guan J, et al.**
Artificial intelligence-based automated laparoscopic cholecystectomy surgical phase recognition and analysis. *Surg. Endosc.* 2022;36:3160-8.
- 154. Kitaguchi D, Takeshita N, Matsuzaki H, Takano H, Owada Y, Enomoto T, et al.**
Real-time automatic surgical phase recognition in laparoscopic sigmoidectomy using the convolutional neural network-based deep learning approach. *Surg. Endosc.* 2020;34:4924-31.
- 155. Tanzi L, Piazzolla P, Vezzetti E.**
INTRAOPERATIVE surgery room management: A deep learning perspective. *Int. J. Med. Robot.* 2020;16:1-12.
- 156. Namazi B, Sankaranarayanan G, Devarajan V.**
A Contextual Detector of Surgical Tools in Laparoscopic Videos Using Deep Learning. *Surg. Endosc.* 2022;36:679-88.
- 157. Yamazaki Y, Kanaji S, Matsuda T, Oshikiri T, Nakamura T, Suzuki S, et al.**
Automated Surgical Instrument Detection from Laparoscopic Gastrectomy Video Images Using an Open Source Convolutional Neural Network Platform. *J. Am. Coll. Surg.* 2020;230:725-732e1.
- 158. Chadebecq F, Vasconcelos F, Mazomenos E, Stoyanov D.**
Computer Vision in the Surgical Operating Room. *Visc. Med.* 2020;36:456-62.

- 159. Oh N, Kim B, Kim T, Rhu J, Kim J, Choi GS.**
Real-time segmentation of biliary structure in pure laparoscopic donor hepatectomy. *Sci. Rep.* 2024;14:22508.
- 160. Kojima S, Kitaguchi D, Igaki T, Nakajima K, Ishikawa Y, Harai Y, et al.**
Deep-learning-based semantic segmentation of autonomic nerves from laparoscopic images of colorectal surgery: an experimental pilot study. *Int. J. Surg.* 2023;109:813–20.
- 161. Kumazu Y, Kobayashi N, Kitamura N, Rayan E, Neculoiu P, Misumi T, et al.**
Automated segmentation by deep learning of loose connective tissue fibers to define safe dissection planes in robot-assisted gastrectomy. *Sci. Rep.* 2021;11:21198.
- 162. Madani A, Namazi B, Altieri MS, Hashimoto DA, Rivera AM, Pucher PH, et al.**
Artificial Intelligence for Intraoperative Guidance: Using Semantic Segmentation to Identify Surgical Anatomy During Laparoscopic Cholecystectomy. *Ann. Surg.* 2022;276:363–9.
- 163. Jung WJ, Kwak KS, Lim SC.**
Vision-Based Suture Tensile Force Estimation in Robotic Surgery. *Sensors* 2020;21:110.
- 164. Abeywardena S, Yuan Q, Tzemanaki A, Psomopoulou E, Droukas L, Melhuish C, et al.**
Estimation of Tool-Tissue Forces in Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery Using Neural Networks. *Front. Robot. AI* [Internet] 2019 [cited 2024 Nov 26];6. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2019.00056/full>
- 165. Wagner M, Bihlmaier A, Kenngott HG, Mietkowski P, Scheikl PM, Bodenstedt S, et al.**
A learning robot for cognitive camera control in minimally invasive surgery. *Surg. Endosc.* 2021;35:5365–74.
- 166. Richter F, Shen S, Liu F, Huang J, Funk EK, Orosco RK, et al.**
Autonomous Robotic Suction to Clear the Surgical Field for Hemostasis Using Image-Based Blood Flow Detection. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2021;6:1383–90.
- 167. Vargas HF, Vivas A, Bastidas S, Gomez H, Correa K, Muñoz V.**
Advances towards autonomous robotic suturing: Integration of finite element force analysis and instantaneous wound detection through deep learning. *Biomed. Signal Process. Control* 2025;101:107181.
- 168. Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, Wei S, Leonard S, Hsieh MH, et al.**
Autonomous Robotic Laparoscopic Surgery for Intestinal Anastomosis. *Sci. Robot.* 2022;7:eabj2908.

- 169. Soori M, Arezoo B, Dastres R.**
Artificial Intelligence, Machine Learning and Deep Learning in Advanced Robotics, A Review. Cogn. Robot. [Internet] 2023 [cited 2024 Nov 23]; Available from: <https://hal.science/hal-04068480>
- 170. Ceccarelli G, Forgione A, Andolfi E, Rocca A, Giuliani A, Calise F.**
Evolving Technologies in the Operating Room for Minimally Invasive Pancreatic Surgery [Internet]. In: Boggi U, editor. Minimally Invasive Surgery of the Pancreas. Milano: Springer Milan; 2018 [cited 2024 Nov 29]. page 15–26. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-88-470-3958-2_2
- 171. Sauer IM, Queisner M, Tang P, Moosburner S, Hoepfner O, Horner R, et al.**
Mixed Reality in Visceral Surgery: Development of a Suitable Workflow and Evaluation of Intraoperative Use—cases. Ann. Surg. 2017;266:706–12.
- 172. Ivanov VM, Krivtsov AM, Strelkov SV, Smirnov AYu, Shipov RYu, Grebenkov VG, et al.**
Practical Application of Augmented/Mixed Reality Technologies in Surgery of Abdominal Cancer Patients. J. Imaging 2022;8:183.
- 173. Javaheri H, Ghamarnejad O, Bade R, Lukowicz P, Karolus J, Stavrou GA.**
Beyond the visible: preliminary evaluation of the first wearable augmented reality assistance system for pancreatic surgery. Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg. [Internet] 2024 [cited 2025 Jan 5]; Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s11548-024-03131-0>
- 174. Tao H, Lin J, Luo W, Chen R, Zhu W, Fang C, et al.**
Application of Real-Time Augmented Reality Laparoscopic Navigation in Splenectomy for Massive Splenomegaly. World J. Surg. 2021;45:2108–15.
- 175. Xue B, Li D, Lu C, King CR, Wildes T, Avidan MS, et al.**
Use of Machine Learning to Develop and Evaluate Models Using Preoperative and Intraoperative Data to Identify Risks of Postoperative Complications. JAMA Netw. Open 2021;4:e212240.
- 176. Pan S, Bian L, Luo H, Conway A, Qiao W, Win T, et al.**
Risk factor analysis and prediction model construction for surgical patients with venous thromboembolism: a prospective study. Interdiscip. Nurs. Res. [Internet] 2024 [cited 2025 Jan 1]; Available from: <https://journals.lww.com/10.1097/NR9.0000000000000047>
- 177. Shao S, Liu L, Zhao Y, Mu L, Lu Q, Qin J.**
Application of Machine Learning for Predicting Anastomotic Leakage in Patients with Gastric Adenocarcinoma Who Received Total or Proximal Gastrectomy. J. Pers. Med. 2021;11:748.

- 178. Emile SH, Ghareeb W, Elfeki H, El Sorogy M, Fouad A, Elrefai M.**
Development and Validation of an Artificial Intelligence–Based Model to Predict Gastroesophageal Reflux Disease After Sleeve Gastrectomy. *Obes. Surg.* 2022;32:2537–47.
- 179. Chen C, Chen B, Yang J, Li X, Peng X, Feng Y, et al.**
Development and validation of a practical machine learning model to predict sepsis after liver transplantation. *Ann. Med.* 55:624–33.
- 180. Liu Y, Liu C, Gao M, Wang Y, Bai Y, Xu R, et al.**
Evaluation of a wearable wireless device with artificial intelligence, iThermonitor WT705, for continuous temperature monitoring for patients in surgical wards: a prospective comparative study. *BMJ Open* 2020;10:e039474.
- 181. Bergholz A, Greiwe G, Kouz K, Saugel B.**
Continuous Blood Pressure Monitoring in Patients Having Surgery: A Narrative Review. *Medicina (Mex.)* 2023;59:1299.
- 182. Hatib F, Jian Z, Buddi S, Lee C, Settels J, Sibert K, et al.**
Machine–learning Algorithm to Predict Hypotension Based on High–fidelity Arterial Pressure Waveform Analysis. *Anesthesiology* 2018;129:663–74.
- 183. van de Sande D, van Genderen ME, Verhoef C, Huiskens J, Gommers D, van Unen E, et al.**
Optimizing discharge after major surgery using an artificial intelligence–based decision support tool (DESIRE): An external validation study. *Surgery* 2022;172:663–9.
- 184. Wen Z, Wang Y, Chen S, Li Y, Deng H, Pang H, et al.**
Construction of a predictive model for postoperative hospitalization time in colorectal cancer patients based on interpretable machine learning algorithm: a prospective preliminary study. *Front. Oncol.* 2024;14:1384931.
- 185. Berlet M, Vogel T, Ostler D, Czempiel T, Kähler M, Brunner S, et al.**
Surgical reporting for laparoscopic cholecystectomy based on phase annotation by a convolutional neural network (CNN) and the phenomenon of phase flickering: a proof of concept. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2022;17:1991–9.
- 186. P J, G G, V VK, Chopra H, Emran TB.**
Enhancing postoperative care with telemedicine and remote monitoring for improved recovery and patient safety. *Int. J. Surg. Lond. Engl.* 2024;110:8205–6.
- 187. P J, G G, V VK, Chopra H, Emran TB.**
Enhancing postoperative care with telemedicine and remote monitoring for improved recovery and patient safety. *Int. J. Surg. Lond. Engl.* 2024;110:8205–6.

- 188. Soon S, Svavarsdottir H, Downey C, Jayne DG.**
Wearable devices for remote vital signs monitoring in the outpatient setting: an overview of the field. *BMJ Innov.* 2020;6:55–71.
- 189. Short WD, Olutoye OO, Padon BW, Parikh UM, Colchado D, Vangapandu H, et al.**
Advances in non-invasive biosensing measures to monitor wound healing progression. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2022;10:952198.
- 190. Riccio G.**
VeCare, pansement intelligent qui surveille les plaies en temps réel [Internet]. *Futuro Prossimo*2022 [cited 2025 Mar 14]; Available from: <https://fr.futuroprossimo.it/2022/01/bendaggio-intelligente-monitora-ferite/>
- 191. Wells CI, Xu W, Penfold JA, Keane C, Gharibans AA, Bissett IP, et al.**
Wearable devices to monitor recovery after abdominal surgery: scoping review. *BJs Open* 2022;6:zrac031.
- 192. Bilgic E, Gorgy A, Young M, Abbasgholizadeh-Rahimi S, Harley JM.**
Artificial Intelligence in Surgical Education: Considerations for Interdisciplinary Collaborations. *Surg. Innov.* 2022;29:137–8.
- 193. Bhagat TS, Bhagat R, Gulati G.**
Embarking on the journey of artificial intelligence for teaching surgery to medical students. *Santosh Univ. J. Health Sci.* 2024;10:3–7.
- 194. Schott D, Saalfeld P, Schmidt G, Joeres F, Boedecker C, Huettl F, et al.**
A VR/AR Environment for Multi-User Liver Anatomy Education [Internet]. In: 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Lisboa, Portugal: IEEE; 2021 [cited 2025 Mar 16]. page 296–305. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9417662/>
- 195. Guerrero DT, Asaad M, Rajesh A, Hassan A, Butler CE.**
Advancing Surgical Education: The Use of Artificial Intelligence in Surgical Training. *Am. Surg.* 2023;89:49–54.
- 196. Mori T, Ikeda K, Takeshita N, Teramura K, Ito M.**
Validation of a novel virtual reality simulation system with the focus on training for surgical dissection during laparoscopic sigmoid colectomy. *BMC Surg.* 2022;22:12.
- 197. Heinrich F, Huettl F, Schmidt G, Paschold M, Kneist W, Huber T, et al.**
HoloPointer: a virtual augmented reality pointer for laparoscopic surgery training. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2021;16:161–8.
- 198. A. Butt K, Augestad KM.**
Educational value of surgical telementoring. *J. Surg. Oncol.* 2021;124:231–40.

- 199. Amadi SM, Mao J, Zhu Z, Wang X, Xu X, Ma L, et al.**
3D printed models and Artificial Intelligence: A review of their impact in robotic surgery training. *Intell. Surg.* 2023;6:54–60.
- 200. Liu R, An J, Wang Z, Guan J, Liu J, Jiang J, et al.**
Artificial intelligence in laparoscopic cholecystectomy: does computer vision outperform human vision? *Artif. Intell. Surg.* 2022;2:80–92.
- 201. Pedrett R, Mascagni P, Beldi G, Padoy N, Lavanchy JL.**
Technical skill assessment in minimally invasive surgery using artificial intelligence: a systematic review. *Surg. Endosc.* 2023;37:7412–24.
- 202. Lavanchy JL, Zindel J, Kirtac K, Twick I, Hosgor E, Candinas D, et al.**
Automation of surgical skill assessment using a three-stage machine learning algorithm. *Sci. Rep.* 2021;11:5197.
- 203. Noroozi M, St John A, Masino C, Laplante S, Hunter J, Brudno M, et al.**
Education in Laparoscopic Cholecystectomy: Design and Feasibility Study of the LapBot Safe Chole Mobile Game. *JMIR Form. Res.* 2024;8:e52878.
- 204. Taher H, Grasso V, Tawfik S, Gumbs A.**
The challenges of deep learning in artificial intelligence and autonomous actions in surgery: a literature review. *Artif. Intell. Surg.* 2022;2:144–58.
- 205. Johansson B, Eriksson E, Berglund N, Lindgren I.**
Robotic Surgery: Review on Minimally Invasive Techniques. *Fusion Multidiscip. Res. Int. J.* 2021;2:201–10.
- 206. Van Der Meijden SL, Arbous MS, Geerts BF.**
Possibilities and challenges for artificial intelligence and machine learning in perioperative care. *BJA Educ.* 2023;23:288–94.
- 207. FERRERES AR.**
Ethical aspects of artificial intelligence in general surgical practice. *Rev. Colégio Bras. Cir.* 51:e20243762EDIT01.
- 208. Cobianchi L, Verde JM, Loftus TJ, Piccolo D, Dal Mas F, Mascagni P, et al.**
Artificial Intelligence and Surgery: Ethical Dilemmas and Open Issues. *J. Am. Coll. Surg.* 2022;235:268–75.

209. Marques M, Almeida A, Pereira H.

The Medicine Revolution Through Artificial Intelligence: Ethical Challenges of Machine Learning Algorithms in Decision-Making. *Cureus* [Internet] 2024 [cited 2025 Jan 12]; Available from: <https://www.cureus.com/articles/288300-the-medicine-revolution-through-artificial-intelligence-ethical-challenges-of-machine-learning-algorithms-in-decision-making>

210. Ahmad A, Tariq A, Hussain HK, Gill AY.

Equity and Artificial Intelligence in Surgical Care: A Comprehensive Review of Current Challenges and Promising Solutions. *BULLET J. Multidisiplin Ilmu* 2023;2:443-55.

211. Information Technology and Law Graduate Programme Ghana Institute of Management and Public Administration Greenhill, Accra, Ghana E-mail: nutifafacudjoe@gmail.com Phone: +233502477709, Amedior NC. Ethical Implications of Artificial Intelligence in the Healthcare Sector. *Adv. Multidiscip. Sci. Res. J. Publ.* 2023;36:1-12.

212. Hammad Raza.

Ensuring Fairness in AI: Crafting Legal and Ethical Standards for Algorithmic Equity [Internet]. 2024 [cited 2025 Jan 19]; Available from: <https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.24957.58088>

213. Cachat-Rosset G, Klarsfeld A.

Diversity, Equity, and Inclusion in Artificial Intelligence: An Evaluation of Guidelines. *Appl. Artif. Intell.* 2023;37:2176618.

214. Capelli G, Verdi D, Frigerio I, Rashidian N, Ficorilli A, Grasso SV, et al.

White paper: ethics and trustworthiness of artificial intelligence in clinical surgery. *Artif. Intell. Surg.* 2023;3:111-22.

215. Jabir H, Lagtati K, Pohe-Tokpa D.

Ethical and Legal Regulation of Using Artificial Intelligence in Morocco. *J. Digit. Technol. Law* 2024;2:450-72.

216. ADNANI Elmehdi, HAOUNANI Amine.

L'intelligence Artificielle au Maroc : Entre éthique et réglementation. 2024 [cited 2024 Nov 1]; Available from: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.11621028>

217. Van Kolfshooten H, Van Oirschot J.

The EU Artificial Intelligence Act (2024): Implications for healthcare. *Health Policy* 2024;149:105152.

218. Aboy M, Minssen T, Vayena E.

Navigating the EU AI Act: implications for regulated digital medical products. *Npj Digit. Med.* 2024;7:237.

219. Voskens FJ, Abbing JR, Ruys AT, Ruurda JP, Broeders IAMJ.

A nationwide survey on the perceptions of general surgeons on artificial intelligence. *Artif. Intell. Surg.* [Internet] 2022 [cited 2025 Feb 13]; Available from: <https://www.oaepublish.com/articles/ais.2021.10>

220. St John A, Cooper L, Kavic SM.

The Role of Artificial Intelligence in Surgery: What do General Surgery Residents Think? *Am. Surg.* 2024;90:541-9.



قسم الطبيب

أُقْسِمُ بِاللَّهِ الْعَظِيمِ

أَنْ أَر_اقِبَ اللَّهَ فِي مِهْنَتِي.

وَأَنْ أَصُونَ حَيَاةَ الْإِنْسَانِ فِي كَافَّةِ أَطْوَارِهَا فِي كُلِّ الظُّرُوفِ
وَالْأَحْوَالِ بِإِذْنِ اللَّهِ وَسَعْيِي فِي إِنْقَادِهَا مِنَ الْهَلَاكِ وَالْمَرَضِ
وَالْأَلَمِ وَالْقَلْقِ.

وَأَنْ أَحْفَظَ لِلنَّاسِ كِرَامَتَهُمْ، وَأَسْتُرَ عَوْرَتَهُمْ، وَأَكْتُمَ سِرَّهُمْ.

وَأَنْ أَكُونَ عَلَى الدَّوَامِ مِنْ وَسَائِلِ رَحْمَةِ اللَّهِ، بِإِذْنِ رِعَايَتِي الطَّبِيبَةَ لِلْقَرِيبِ وَالْبَعِيدِ،
لِلصَّالِحِ وَالطَّالِحِ، وَالصَّدِيقِ وَالْعَدُوِّ.

وَأَنْ أَثَابِرَ عَلَى طَلْبِ الْعِلْمِ، وَأَسْخِرَهُ لِنَفْعِ الْإِنْسَانِ لَا لِأَذَاهِ.

وَأَنْ أُوَقِّرَ مَنْ عَلَّمَنِي، وَأُعَلِّمَ مَنْ يَصْغُرَنِي، وَأَكُونَ أَخًا لِكُلِّ زَمِيلٍ فِي الْمِهْنَةِ الطَّبِيبَةِ
مُتَعَاوِنِينَ عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَى.

وَأَنْ تَكُونَ حَيَاتِي مِصْدَاقَ إِيمَانِي فِي سِرِّي وَعَلَانِيَتِي، نَقِيَّةً مِمَّا يُشِينُهَا تَجَاهَ
اللَّهِ وَرَسُولِهِ وَالْمُؤْمِنِينَ.

وَاللَّهُ عَلَى مَا أَقُولُ شَهِيدٌ



إدماج الذكاء الاصطناعي في الجراحة الباطنية

الأطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم 2025/ 05 / 13
من طرف

السيد: أيمن حمادي

المزاداد في 22 / 06 / 1999 بتنغير

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات الأساسية:

الذكاء الاصطناعي – الروبوتات الجراحية – الواقع الافتراضي

اللجنة

الرئيس	ع.لوزي	السيد
المشرف	أستاذ في الجراحة الباطنية	السيد
الحكام	خ. الرباتي	السيد
	أستاذ في الجراحة الباطنية	السيدة
	م.والي إدريسي	السيد
	أستاذة في طب الأشعة	السيد
	م.الحكيم	السيد
	أستاذ في الجراحة الباطنية	السيد
	ه.فنان	السيد
	أستاذ في جراحة الصدر	