

Année 2019/2020

N°

Thèse

Pour le

DOCTORAT EN MEDECINE

Diplôme d'État

par

Pierre MEIGNAN

Né le 13 août 1990 au Mans (72)

CHIRURGIE MINI-INVASIVE ROBOT ASSISTEE EN ONCOLOGIE
PEDIATRIQUE. UNE EXPERIENCE MULTICENTRIQUE.

Présentée et soutenue publiquement le **28 avril 2020** date devant un jury composé de :

Président du Jury :

Professeur Hubert Lardy, Chirurgie viscérale urologique et plastique pédiatrique, Faculté de Médecine – Tours

Membres du Jury :

Professeur Hubert Lardy, Chirurgie viscérale urologique et plastique pédiatrique, Faculté de Médecine – Tours

Professeur Sabine SARNACKI, Chirurgie viscérale pédiatrique et urologie, Faculté de Médecine – Paris Descartes

Professeur Laurent FOURCADE, Chirurgie pédiatrique viscérale et urologique, Faculté de Médecine – Limoges

Professeur Emmanuel GYAN, Hématologie et Thérapie cellulaire adulte et pédiatrique, Faculté de Médecine – Tours

Docteur Aurélien BINET, Chirurgie viscérale urologique et plastique pédiatrique, Assistant spécialiste, Faculté de Médecine – Tours

***Directeur de thèse :** Docteur Thomas BLANC, Chirurgie viscérale pédiatrique et urologie, MCU-PH, Faculté de Médecine – Paris Descartes*

UNIVERSITE DE TOURS

FACULTE DE MEDECINE DE TOURS

DOYEN

Pr Patrice DIOT

VICE-DOYEN

Pr Henri MARRET

ASSESEURS

Pr Denis ANGOULVANT, Pédagogie
Pr Mathias BUCHLER, Relations internationales
Pr Theodora BEJAN - ANGOULVANT, Moyens – relations avec l'Université
Pr Clarisse DIBAO-DINA, Médecine générale
Pr François MAILLOT, Formation Médicale Continue
Pr Patrick VOURC'H, Recherche

RESPONSABLE ADMINISTRATIVE

Mme Fanny BOBLETER

DOYENS HONORAIRES

Pr Emile ARON (†) – 1962-1966
Directeur de l'Ecole de Médecine - 1947-1962
Pr Georges DESBUQUOIS (†) - 1966-1972
Pr André GOUAZE - 1972-1994
Pr Jean-Claude ROLLAND – 1994-2004
Pr Dominique PERROTIN – 2004-2014

PROFESSEURS EMERITES

Pr Daniel ALISON
Pr Philippe ARBEILLE
Pr Catherine BARTHELEMY
Pr Gilles BODY
Pr Jacques CHANDENIER
Pr Alain CHANTEPIE
Pr Pierre COSNAY
Pr Etienne DANQUECHIN-DORVAL
Pr Dominique GOGA
Pr Alain GOUDEAU
Pr Anne-Marie LEHR-DRYLEWICZ
Pr Gérard LORETTE
Pr Roland QUENTIN
Pr Elie SALIBA

PROFESSEURS HONORAIRES

P. ANTHONIOZ – A. AUDURIER – A. AUTRET – P. BAGROS – P. BARDOS – J.L. BAULIEU – C. BERGER – JC. BESNARD – P. BEUTTER – C. BONNARD – P. BONNET – P. BOUGNOUX – P. BURDIN – L. CASTELLANI – B. CHARBONNIER – P. CHOUTET – T. CONSTANS – C. COUET – L. DE LA LANDE DE CALAN – J.P. FAUCHIER – F. FETISSOF – J. FUSCIARDI – P. GAILLARD – G. GINIES – A. GOUAZE – J.L. GUILMOT – N. HUTEN – M. JAN – J.P. LAMAGNERE – F. LAMISSE – Y. LANSON – O. LE FLOCH – Y. LEBRANCHU – E. LECA – P. LECOMTE – E. LEMARIE – G. LEROY – M. MARCHAND – C. MAURAGE – C. MERCIER – J. MOLINE – C. MORAINÉ – J.P. MUH – J. MURAT – H. NIVET – L. POURCELOT – P. RAYNAUD – D. RICHARD-LENOBLE – A. ROBIER – J.C. ROLLAND – D. ROYERE – A.SAINDELLE – J.J. SANTINI – D. SAUVAGE – D. SIRINELLI – B. TOUMIEUX – J. WEILL

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

ANDRES Christian Biochimie et biologie moléculaire
ANGOULVANT Denis Denis Cardiologie
AUPART Michel Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BABUTY Dominique Cardiologie
BAKHOS David..... Oto-rhino-laryngologie
BALLON Nicolas Psychiatrie ; addictologie
BARILLOT Isabelle Cancérologie ; radiothérapie
BARON Christophe Immunologie
BEJAN-ANGOULVANT Théodora Pharmacologie clinique
BERNARD Anne Cardiologie
BERNARD Louis Maladies infectieuses et maladies tropicales
BLANCHARD-LAUMONNIER Emmanuelle Biologie cellulaire
BLASCO Hélène Biochimie et biologie moléculaire
BODY Gilles Gynécologie et obstétrique
BONNET-BRILHAULT Frédérique Physiologie
BRILHAULT Jean Chirurgie orthopédique et traumatologique
BRUNEREAU Laurent Radiologie et imagerie médicale
BRUYERE Franck Urologie
BUCHLER Matthias Néphrologie
CALAIS Gilles Cancérologie, radiothérapie
CAMUS Vincent Psychiatrie d'adultes
COLOMBAT Philippe Hématologie, transfusion
CORCIA Philippe Neurologie
COTTIER Jean-Philippe Radiologie et imagerie médicale
DE TOFFOL Bertrand Neurologie
DEQUIN Pierre-François Thérapeutique
DESOUBEAUX Guillaume Parasitologie et mycologie
DESTRIEUX Christophe Anatomie
DIOT Patrice Pneumologie
DU BOUEXIC de PINIEUX Gonzague Anatomie & cytologie pathologiques
DUCLUZEAU Pierre-Henri Endocrinologie, diabétologie, et nutrition
DUMONT Pascal Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
EL HAGE Wissam Psychiatrie adultes
EHRMANN Stephan Réanimation
FAUCHIER Laurent Cardiologie
FAVARD Luc Chirurgie orthopédique et traumatologique
FOUGERE Bertrand Gériatrie
FOUQUET Bernard Médecine physique et de réadaptation
FRANCOIS Patrick Neurochirurgie
FROMONT-HANKARD Gaëlle Anatomie & cytologie pathologiques
GAUDY-GRAFFIN Catherine Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
GOUPILLE Philippe Rhumatologie
GRUEL Yves Hématologie, transfusion
GUERIF Fabrice Biologie et médecine du développement et de la reproduction
GUYETANT Serge Anatomie et cytologie pathologiques
GYAN Emmanuel Hématologie, transfusion
HAILLOT Olivier Urologie
HALIMI Jean-Michel Thérapeutique

HANKARD Régis	Pédiatrie
HERAULT Olivier	Hématologie, transfusion
HERBRETEAU Denis	Radiologie et imagerie médicale
HOURIOUX Christophe	Biologie cellulaire
LABARTHE François	Pédiatrie
LAFFON Marc	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LARDY Hubert	Chirurgie infantile
LARIBI Saïd	Médecine d'urgence
LARTIGUE Marie-Frédérique	Bactériologie-virologie
LAURE Boris	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
LECOMTE Thierry	Gastroentérologie, hépatologie
LESCANNE Emmanuel	Oto-rhino-laryngologie
LINASSIER Claude	Cancérologie, radiothérapie
MACHET Laurent	Dermato-vénéréologie
MAILLOT François	Médecine interne
MARCHAND-ADAM Sylvain.....	Pneumologie
MARRET Henri	Gynécologie-obstétrique
MARUANI Annabel	Dermatologie-vénéréologie
MEREGHETTI Laurent	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
MITANCHEZ Delphine.....	Pédiatrie
MORINIERE Sylvain	Oto-rhino-laryngologie
MOUSSATA Driffa	Gastro-entérologie
MULLEMAN Denis	Rhumatologie
ODENT Thierry	Chirurgie infantile
OUAISSI Mehdi	Chirurgie digestive
OULDAMER Lobna	Gynécologie-obstétrique
PAINTAUD Gilles	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
PATAT Frédéric	Biophysique et médecine nucléaire
PERROTIN Dominique	Réanimation médicale, médecine d'urgence
PERROTIN Franck	Gynécologie-obstétrique
PISELLA Pierre-Jean	Ophthalmologie
PLANTIER Laurent	Physiologie
REMERAND Francis	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
ROINGEARD Philippe	Biologie cellulaire
ROSSET Philippe	Chirurgie orthopédique et traumatologique
RUSCH Emmanuel	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
SAINT-MARTIN Pauline	Médecine légale et droit de la santé
SALAME Ephrem	Chirurgie digestive
SAMIMI Mahtab	Dermatologie-vénéréologie
SANTIAGO-RIBEIRO Maria	Biophysique et médecine nucléaire
THOMAS-CASTELNAU Pierre	Pédiatrie
TOUTAIN Annick	Génétique
VAILLANT Loïc	Dermato-vénéréologie
VELUT Stéphane	Anatomie
VOURC'H Patrick	Biochimie et biologie moléculaire
WATIER Hervé	Immunologie

PROFESSEUR DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

DIBAO-DINA Clarisse

LEBEAU Jean-Pierre

PROFESSEURS ASSOCIES

MALLET Donatien Soins palliatifs

POTIER Alain Médecine Générale

ROBERT Jean Médecine Générale

PROFESSEUR CERTIFIE DU 2nd DEGRE

MC CARTHY Catherine..... Anglais

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

BARBIER Louise Chirurgie digestive

BERHOUEZ Julien Chirurgie orthopédique et traumatologique

BRUNAUT Paul Psychiatrie d'adultes, addictologie

CAILLE Agnès Biostat, informatique médical et technologies de communication

CLEMENTY Nicolas Cardiologie

DOMELIER Anne-Sophie Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière

DUFOUR Diane Biophysique et médecine nucléaire

ELKRIEF Laure Hépatologie - gastroentérologie

FAVRAIS Géraldine Pédiatrie

FOUQUET-BERGEMER Anne-Marie Anatomie et cytologie pathologiques

GATAULT Philippe Néphrologie

GOUILLEUX Valérie Immunologie

GUILLON Antoine Réanimation

GUILLON-GRAMMATICO Leslie Epidémiologie, économie de la santé et prévention

HOARAU Cyrille Immunologie

IVANES Fabrice Physiologie

LE GUELLEC Chantal Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique

LEFORT Bruno Pédiatrie

LEGRAS Antoine Chirurgie thoracique

LEMAGNEN Adrien Maladies infectieuses

MACHET Marie-Christine Anatomie et cytologie pathologiques

MOREL Baptiste Radiologie pédiatrique

PIVER Éric Biochimie et biologie moléculaire

REROLLE Camille Médecine légale

ROUMY Jérôme Biophysique et médecine nucléaire

SAUTENET Bénédicte Thérapeutique

TERNANT David Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique

VUILLAUME – WINTER Marie - Laure Génétique

ZEMMOURA Ilyess Neurochirurgie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

AGUILLON-HERNANDEZ Nadia Neurosciences

BOREL Stéphanie..... Orthophonie

NICOGLU Antonine..... Philosophie – histoire des sciences et des techniques

PATIENT Romuald Biologie cellulaire

RENOUX-JACQUET Cécile Médecine Générale

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

BARBEAU Ludivine Médecine Générale

RUIZ Christophe Médecine Générale
SAMKO Boris Médecine Générale

CHERCHEURS INSERM - CNRS - INRA

BOUAKAZ Ayache Directeur de Recherche INSERM – UMR INSERM 1253
CHALON Sylvie Directeur de Recherche INSERM – UMR INSERM 1253
COURTY Yves Chargé de Recherche CNRS – UMR INSERM 1100
DE ROCQUIGNY Hugues Chargé de Recherche INSERM – UMR INSERM 1259
ESCOFFRE Jean-Michel Chargé de Recherche INSERM – UMR INSERM 1253
GILOT Philippe Chargé de Recherche INRA – UMR INRA 1282
GUILLEUX Fabrice Directeur de Recherche CNRS – UMR CNRS 7001
GOMOT Marie Chargée de Recherche INSERM – UMR INSERM 1253
HEUZE-VOURCH Nathalie Chargée de Recherche INSERM – UMR INSERM 1100
KORKMAZ Brice Chargé de Recherche INSERM – UMR INSERM 1100
LAUMONNIER Frédéric Chargé de Recherche INSERM - UMR INSERM 1253
MAZURIER Frédéric Directeur de Recherche INSERM – UMR CNRS 7001
MEUNIER Jean-Christophe Chargé de Recherche INSERM – UMR INSERM 1259
PAGET Christophe Chargé de Recherche INSERM – UMR INSERM 1100
RAOUL William Chargé de Recherche INSERM – UMR CNRS 7001
SI TAHAR Mustapha Directeur de Recherche INSERM – UMR INSERM 1100
WARDAK Claire Chargée de Recherche INSERM – UMR INSERM 1253

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

Pour l'Ecole d'Orthophonie

DELORE Claire Orthophoniste
GOUIN Jean-Marie Praticien Hospitalier

Pour l'Ecole d'Orthoptie

MAJZOUB Samuel Praticien Hospitalier

Pour l'Ethique Médicale

BIRMELE Béatrice Praticien Hospitalier

SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des Maîtres de cette Faculté,
de mes chers condisciples
et selon la tradition d'Hippocrate,
je promets et je jure d'être fidèle aux lois de
l'honneur
et de la probité dans l'exercice de la Médecine.
Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent,
et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon
travail.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux
ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira
les secrets qui me seront confiés et mon état ne
servira pas
à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.
Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres,
je rendrai à leurs enfants
l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.
Que les hommes m'accordent leur estime
si je suis fidèle à mes promesses.
Que je sois couvert d'opprobre
et méprisé de mes confrères
si j'y manque.

RÉSUMÉ :

Les avantages de la chirurgie mini-invasive sont largement démontrés. La chirurgie robotique, qui s'inscrit comme une évolution de la chirurgie mini-invasive, est encore peu utilisée chez l'enfant, en particulier dans le domaine de la chirurgie oncologique.

L'objet de ce travail est d'analyser les résultats préliminaires d'une série multicentrique française de tumeurs chez l'enfant opéré en chirurgie robotique, en termes d'indications opératoires, de morbidité et de résultats à moyen terme.

La première partie retrace l'évolution de la chirurgie mini-invasive puis de la chirurgie robotique.

La seconde partie s'intéresse aux spécificités pédiatriques de la chirurgie mini-invasive.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de la pertinence de la chirurgie mini-invasive et plus spécifiquement de la chirurgie robotique en oncologie pédiatrique.

Les résultats d'une série multicentrique de 77 enfants opérés d'une tumeur par laparoscopie ou thoracoscopie robot-assistée entre 2008 et 2020 à Limoges, Necker – Enfants Malades (Paris) et Tours sont analysés en quatrième partie.

Le dernier chapitre présente les innovations et les perspectives du développement de la chirurgie robotique en oncologie pédiatrique. La chirurgie guidée par l'image, avec en particulier la reconstruction en trois dimensions de l'anatomie du patient et son utilisation au bloc opératoire, fera partie intégrante de la chirurgie oncologique pédiatrique dans les années futures.

Mots clés : robot – chirurgie pédiatrique – cancer – chirurgie mini-invasive

ABSTRACT:

The advantages of mini-invasive surgery are now well known. Whereas the use of robotics in adult oncology has become commonplace, it remains rarely used in pediatric oncology.

The objective of this work is to analyze the preliminary results of a multicentric experience of robotic pediatric tumor resections. We will try to discuss the indications, morbidity and mid-term results.

The first chapter describes the evolution of mini-invasive surgery and then robotic surgery.

The second part of this work is dedicated to the pediatric specificities of mini-invasive surgery.

The third part is the analysis of the development of mini-invasive surgery and especially robotic surgery in pediatric oncology.

The results of a multicentric series of 77 children who underwent robotic tumor resections between 2008 and 2020 in Limoges, Necker – Enfants Malades (Paris) and Tours were analyzed.

The last chapter presents the innovations and perspectives in the development of robotic surgery in pediatric oncology. Image-guided surgery with 3D reconstructions of the anatomy of the patient will be integrated in pediatric oncologic surgery in the future.

Key words : robot – pediatric surgery – cancer – mini-invasive surgery

REMERCIEMENTS

Aux membres du jury

A monsieur le Professeur Hubert LARDY

Vous me faites l'honneur de présider mon jury. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée quand je suis arrivé à Tours pour débiter ma formation en chirurgie pédiatrique. Vous savez rester humain et chaleureux dans la relation que vous entretenez avec vos internes et c'est plus qu'appréciable. Merci également de m'avoir laissé autant de liberté pour mes choix de stages tout au long de mon internat.

A madame la Professeure Sabine SARNACKI

Je suis très honoré de votre présence dans mon jury de thèse. Merci pour cette année et demie d'interCHU puis de master 2 passée sous votre direction à Necker – Enfants malades. Votre passion pour la recherche et l'innovation en chirurgie est inspirante et nécessaire à notre spécialité. Vous êtes un modèle pour nombre de chirurgiens pédiatres à la fois pour votre professionnalisme et votre sympathie.

A mon directeur de thèse, monsieur Thomas BLANC

Merci de m'avoir encadré sur ce projet de thèse. Merci pour vos conseils avisés, votre soutien et votre disponibilité. Votre motivation pour la recherche est un véritable moteur pour les internes et chefs travaillant à vos côtés. Votre rigueur chirurgicale, particulièrement en chirurgie mini-invasive, est exemplaire.

A monsieur le Professeur Laurent FOURCADE

Merci d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Vous êtes avec Monsieur Lardy les pionniers de la mise en place de la chirurgie robotique chez l'enfant en France. Soyez assuré de mon profond respect.

A monsieur le Professeur Emmanuel GYAN

Merci de faire partie de mon jury. J'espère que ce sujet vous a intéressé. Je suis honoré de votre présence ce jour.

A monsieur Aurélien BINET

Merci d'avoir accepté de juger mon travail. J'ai beaucoup de respect pour que tout le travail que tu réalises et ta motivation sans faille.

A tous ceux qui ont contribué à ma formation

Aux équipes de chirurgie viscérale du CHU à Tours dans lesquelles j'ai découvert la chirurgie lors de mes deux premiers semestres. Les patrons avec qui j'ai quelques souvenirs émus Pr Salamé « qu'on m'amène un foie » ou alors Pr De Calan la main dans le ventre « vous voyez Meignan, ça c'est pas du mini-invasif ». La chirurgie la vraie. Céline, merci pour le coaching sur ma première garde. Vincent un modèle. Monsieur Bourlier « connaissez-vous la méthode de Taylor ? ». Une pensée pour tous mes co-internes de cette période : Grégoire et Julien qui m'ont bien géré au tout début, Lise, Alice, Nicolas, Ludwig, Guénolé, Marion, Othman. Et

petite pensée aux infirmières qui elles aussi m'ont beaucoup appris : Pauline, Carine, Faustine, Nathalie ... et j'en oublie.

Aux équipes de chirurgie pédiatrique de Clocheville. A Anne et Karim avec qui ce sera un plaisir de travailler pendant ce clinicat. A Thierry avec qui je partage la même passion pour la borne, l'épuisement et le non-respect de son corps. A Aurélien. A tous mes co-internes croisés Sarah, Ibtissam, Khalid, Manon, François, Clémence, Marie, Thuy Tran. Merci à tout le personnel paramédical qui fait un boulot extraordinaire avec les enfants opérés. Une petite attention également pour le service d'orthopédie qui m'a accueilli un semestre : Pr Bonnard, Pr Odent, Dr De Courtivron, Dr Bergerault, Dr Agostini, mon chef Daniel et mon super co-interne Ramy.

Au service de chirurgie digestive de Blois qui offre un stage génial. Kevin le chirurgien qui court plus vite que son ombre (sub 3h au marathon bientôt ?). Gio et Zeynal mes deux anciens cca du CHU, des mecs supers qui sont au-dessus du lot chirurgicalement. Luc la force tranquille.

Au service de chirurgie vasculaire et thoracique avec ses deux chefs de clinique emblématiques complètement fous : Pierre et le chirurgien masqué ▲, Pr Dumont, Dr Dupont, Dr Martinez et Dr Marchand.

Au service de chirurgie pédiatrique de Necker-Enfants malades. Pr Aigrain, Pr Lottmann, Pr Heloury, Pr Chardot, Dr Beaudoin, Dr Rousseau, Carmen, Naziha, Nathalie, Alaa, Jules, Aline et mes co-internes : Nicolas, Camélia, Antoine, Sabrina, Marc, Berenice. Merci d'avoir accepté un jeune provincial mayennais dans l'hôpital de la Galaxie.

Au service de chirurgie urologique à Bretonneau. Pr Bruyere, Dr Boutin, Dr Faivre D'Arcier. A Tristan, Rayan, Florence. Stage très appréciable autant sur le plan professionnel que sur le plan humain avec des co-internes juste top : Pierre Baron de la drogue, Jean Paul la courtisane, Cléber et la petite Mélanie.

A tous mes potes

La bande de mayennais de Saint Mich', Bistouf et son amour de la choucroute, Manu l'auxerrois, Léandre le mec posé, Charles le mec pas posé, Bilon le Trumpiste, Gizou le Cruyffiste, Flop et son garage magique et tous les autres Marion qui a le record de pintes jetées sur mon visage, Juju, Rose, Chico, Clémence, Rody, Marie, Céline, Maxime, JC, Camille, Valou, Manu. A ces soirées au V&B, à la Cara, au James, au Bolech tous ces hauts lieux de l'ouest de la France respectueux de la culture de la déglingue. A taxi Tritz, taxi JPB, taxi ATS, taxi Gaulard, taxi Catherine Meignan (#honte).

A ma bande d'externat d'Angers, Jo et Max, David et Margot le couple le plus parfait de la Terre et leur petit Albin, Lulu, Fouz l'ultra traileuse, Fanny, Solène et sa tribue.

A ma bande d'internat de Tours. A mes deux colocs de toujours : Vicky le parrain du petit Léon, éternel dans l'extrême, Matth la Maz, Théo, Nico, PH, Soso, Charline, Irène, Anaïs, Sacha, Naji, Camille, Romain, Margaux, Axelle, Quitterie, Fred, Popo, Nico, Melissa, Max.

Aux mecs avec qui je cours des distances plus ou moins nobles, dans la rue, la compagne, la montagne, les escaliers, le salon : Simon, Gaëtan, Hicham, Romain, Guigui, Matthieu, Thomas.

A ma famille

A mes parents, mes grands-parents, mon frère, Myriam.

A Léon, mon ptit mec, ce BG.

Liste des abréviations

AESOP : Automated Endoscopic System for Optimal Positioning

APHP : Assistance Publique — Hôpitaux de Paris

CT : Computerized Tomography

CPP : Comité de Protection des Personnes

IDRFs : Image Defined Risk Factors

INRGSS : International Neuroblastoma Risk Group Staging System

MRI : Magnetic Resonance Imaging

NB : neuroblastic tumors

PUMA : Programmable Universal Manipulation Arm

SIOP : International Society of Paediatric Oncology

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	16
Chapitre 1 : Histoire de la chirurgie mini invasive et du robot chirurgical.....	18
I. Histoire de la chirurgie mini-invasive : de la tomie à la scopie	18
II. Histoire du robot chirurgical.....	22
A. Les précurseurs.....	22
B. L'ère moderne : des robots semi-automatisés au bloc opératoire	23
III. Le robot Da Vinci	29
Chapitre 2 : Chirurgie mini-invasive, robotique et pédiatrie	31
I. Chirurgie mini-invasive et pédiatrie	31
A. Les débuts en pédiatrie	31
B. Rationnel de la chirurgie mini-invasive en pédiatrie.....	33
II. Robot et pédiatrie	34
A. En retard par rapport à la chirurgie de l'adulte	34
B. Situation actuelle	35
Chapitre 3 : Chirurgie mini-invasive, robotique et oncologie pédiatrique.....	37
I. Tumeurs pédiatriques.....	37
A. Épidémiologie	37
B. Caractéristiques des cancers pédiatriques	38
C. Place de la chirurgie.....	39
D. Autres traitements.....	42
II. Apports de la chirurgie mini-invasive et de la chirurgie robotique	43
A. Avantages techniques chez l'adulte et l'enfant.....	43
a) La vision.....	43
b) Le contrôle de la caméra.....	44
c) Les bras robotisés.....	44
d) L'ergonomie et le confort du chirurgien.....	45
e) La téléchirurgie.....	45

B. Une meilleure prise en charge globale.....	46
C. Challenges	47
a) La taille.....	47
b) Les principes oncologiques.....	48
c) La courbe d'apprentissage.....	49
d) Durée opératoire	49
e) Un dispositif couteux	50
Chapitre 4 : Article.....	51
The French nationwide experience in pediatric robotic oncology. Lessons learned.....	51
Chapitre 5 : Innovations et perspectives.....	68
I. Chirurgie guidée par l'image	68
II. Élargissement des indications de chirurgie mini-invasive.....	72
III. Apprentissage	73
IV. Nouvelle génération de robots chirurgicaux	73
Conclusion	76

Introduction

L'intérêt de la chirurgie mini-invasive en pédiatrie est largement accepté depuis plus de 20 ans¹. En effet, de nombreuses publications ont démontré les nombreux atouts de la chirurgie mini-invasive à la fois pour l'enfant, les parents, le chirurgien et le système de santé². Pour certaines interventions comme l'appendicectomie ou la chirurgie anti-reflux, la voie d'abord mini-invasive est aujourd'hui le gold standard³.

En oncologie pédiatrique, l'utilisation de la chirurgie mini-invasive a été retardée compte tenu de la crainte de rupture et de dissémination tumorale. Néanmoins, dans un premier temps, dès le début des années 2000, des séries intéressantes ont été publiées pour la chirurgie de la surrenale en cas de neuroblastome ou de phéochromocytome⁴. Dans un second temps, la prise en charge laparoscopique du néphroblastome a été décrite par des équipes françaises⁵ et brésiliennes⁶.

L'intérêt du robot en pédiatrie est beaucoup moins consensuel, en particulier pour l'oncologie pédiatrique, compte tenu de la taille du robot, peu adaptée aux petits enfants, du diamètre et de la longueur des instruments, de l'absence de retour de force et du surcoût. Certaines équipes ont réservé la chirurgie robotique à un rôle diagnostique (biopsies et staging)^{7,8}, alors que d'autres équipes considèrent au contraire que le robot permet de réaliser des chirurgies complexes parfaitement adaptées en oncologie pédiatrique⁹. La sélection minutieuse des enfants en réunion de concertation pluridisciplinaire est un élément clé dans la prise en charge de ces pathologies¹⁰.

Dans un premier chapitre, nous décrivons les étapes du développement de la chirurgie mini-invasive, et en particulier de la chirurgie robotique.

Le deuxième chapitre est consacré aux spécificités pédiatriques en chirurgie mini-invasive.

Le troisième chapitre analyse l'intérêt de la chirurgie mini-invasive, et notamment l'adaptation de l'approche robotique en oncologie pédiatrique.

Le quatrième chapitre s'appuie sur une étude multicentrique d'enfants opérés d'une tumeur en chirurgie robotique.

Le dernier chapitre présente les innovations et les perspectives d'évolution de la chirurgie robotique en oncologie pédiatrique.

Chapitre 1 : Histoire de la chirurgie mini invasive et du robot chirurgical

I. Histoire de la chirurgie mini-invasive : de la tomie à la scopie

Les premières traces d'actes chirurgicaux sont des trépanations retrouvées sur des crânes humains datant de la préhistoire ¹¹. Des gestes tels que le drainage d'abcès ou la suture étaient pratiqués dans les civilisations égyptiennes et grecques. En Europe, il faut attendre la Renaissance pour que les chirurgiens passent du statut de barbier à celui de médecin chirurgien. André Vésale, en Italie, et Ambroise Paré, en France, étudient l'anatomie et l'utilisent dans leur pratique chirurgicale. La chirurgie moderne se développe suite à deux découvertes majeures au XIXème siècle : l'anesthésie et l'antisepsie.

Les méthodes d'exploration non invasives du corps humain n'ont pas attendu que la chirurgie par voie ouverte soit au point. Le développement de la laparoscopie dérive de celui de l'endoscopie, né de la curiosité naturelle et scientifique de l'Homme à explorer les cavités anatomiques. Le premier tube à visée exploratoire adapté pour le rectum est décrit par Hippocrate (460-375) ¹². Albukacim (936-1013) fut le premier à utiliser la réflexion de la lumière pour inspecter une cavité naturelle ¹³. En 1805, Bozzini, obstétricien, crée un tube illuminé par la lumière d'une bougie et un miroir pour explorer l'urètre puis la vessie ¹⁴.



Image 1 : L'endoscope de Bozzini

<https://www.facs.org/about-acs/archives/pasthighlights/bozzinihighlight>

Par la suite, Desormeaux améliore l'endoscope de Bozzini (image 1) en utilisant une lampe à alcool et en focalisant le faisceau de lumière. Spécialisé en urologie, il s'attache particulièrement à mettre au point un cystoscope muni d'un canal opérateur permettant l'urétrotomie. Chirurgien à l'Hôpital Necker, il parvient également à observer l'utérus et l'estomac, et présente ses avancées à l'Académie de Médecine de Paris en 1865.

Kussmaul poursuit les travaux de Desormeaux en adaptant l'angulation de l'endoscope à l'œsophage ¹⁵.

Nitze est considéré comme le père du cystoscope moderne en utilisant un filament de platine et un prisme distal comme source de lumière électrique ¹⁶. Le système est refroidi par un circuit d'eau indépendant (image 2).

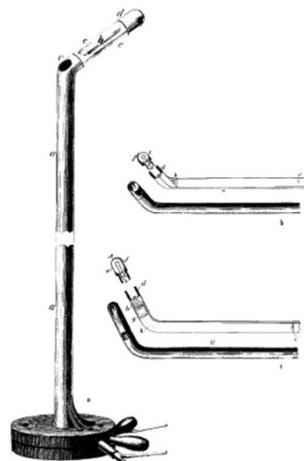


Image 2 : Prototype du cystoscope de Nitze ¹⁶

L'invention de la lampe à incandescence, en 1880, par Edison permet de convertir l'énergie électrique en lumière.

Deux chirurgiens revendiquent les premières laparoscopies. En Allemagne, en 1901, Kelling réussit à visualiser la cavité péritonéale d'un chien en insufflant de l'air dans l'abdomen et en utilisant le cystoscope de Nitze à travers un trocart. Il appelle sa technique la « koelioscopie » (image 3) ¹⁷.

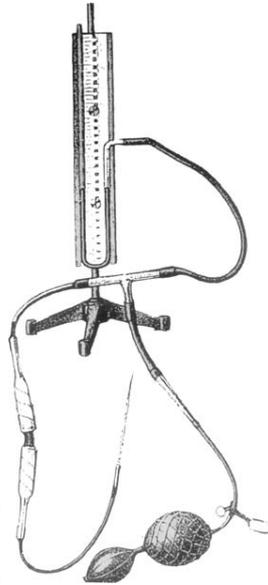


Image 3 : Système d'insufflation de Kelling ¹⁷

Jacobaeus, chirurgien suédois, est souvent considéré comme le vrai père de la laparoscopie et thoracoscopie. Après des expérimentations chez l'animal par Kelling, en 1910, Jacobaeus décrit une série de 97 laparoscopies chez l'homme. Il participe à l'amélioration des instruments utilisés et est le premier à mettre en garde sur le risque de lésion d'organes lors de l'introduction des trocarts ¹⁸.

En 1924, Zollikofer propose de remplacer l'air insufflé dans la cavité péritonéale par du dioxyde de carbone pour une meilleure réabsorption et une réduction des complications thermiques ¹⁹. Kalk crée un canal optique à 135° pour obtenir une vue oblique et met au point la technique de double trocart pour améliorer la sécurité d'introduction des instruments ²⁰.

Plusieurs innovations technologiques ont par la suite contribué à augmenter la sécurité et la qualité du geste. En 1938, Veress crée une aiguille à bout mousse pour l'insufflation, toujours utilisée de nos jours ²¹. En 1952, un groupe de scientifiques français met au point la technologie de la « lumière froide » avec une source de lumière proximale à l'extérieur de la cavité abdominale réduisant ainsi les risques de lésions thermiques. Puis Kurt Semm, gynécologue, développe plusieurs innovations : une machine d'insufflation automatique monitorant la pression intra-abdominale, des instruments de thermocoagulation, de morcellement et

d'irrigation/aspiration. Il est également le premier à réaliser une appendicectomie par laparoscopie (image 4) en 1983 ²².

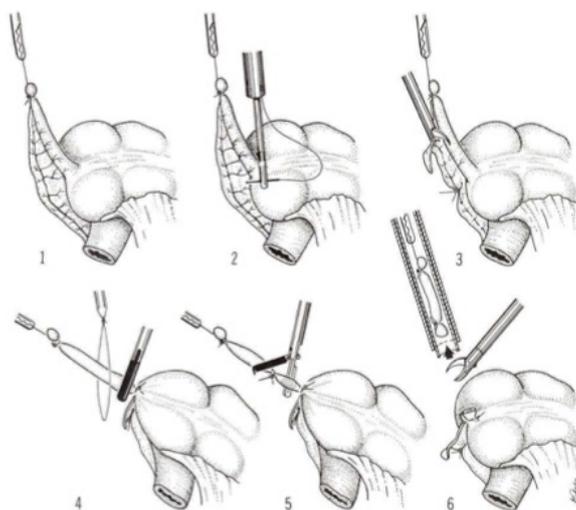


Image 4 : Etapes décrites par Semm de la première appendicectomie par laparoscopie ²²

Il faut attendre 1986 et la possibilité de retransmettre l'image de la caméra sur un écran dans le bloc opératoire pour que les techniques de laparoscopie se développent en chirurgie générale.

En 1987, la première cholécystectomie par laparoscopie est réalisée par le Pr Mouret à Lyon ²³.

Suite à cette prouesse, les techniques de laparoscopie se sont répandues rapidement. Des essais cliniques ont montré la supériorité en termes de temps d'hospitalisation, de cicatrisation, de bénéfice esthétique et de coûts dans de nombreuses indications.

L'adage « grande incision - grand chirurgien » a été balayé dans les années 1990 avec le développement de la chirurgie mini invasive. Qu'en est-il des différentes techniques de chirurgie mini-invasive ?

II. Histoire du robot chirurgical

A. Les précurseurs

Les vingt dernières années ont vu le développement de nouvelles technologies dont le robot chirurgical. Mais ce dernier tient ses origines de précurseurs beaucoup plus anciens. Bien que le terme « robot » vienne du tchèque « robota » signifiant travail, les premiers robots que l'Homme a créés étaient des machines fonctionnant de façon autonome.

La première trace retrouvée correspond au « pigeon volant » du philosophe grec Archytas en 400 avant JC (image 5), cette machine en bois se propulsant de façon autonome à la vapeur aurait volé jusqu'à 200 pieds au-dessus du niveau du sol ²⁴.

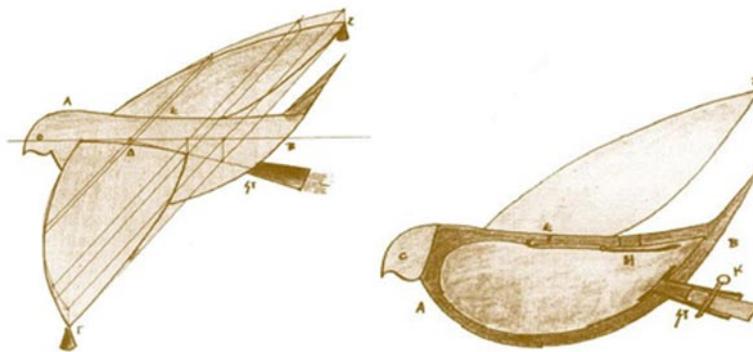


Image 5 : Le « pigeon volant » d'Archytas.

<https://www.ancient-origins.net/ancient-technology/steam-powered-pigeon-archytas-flying-machine-antiquity-002179>

Léonard de Vinci a par la suite contribué grâce à ses nombreuses inventions à l'évolution de la robotique. Il crée le premier robot à échelle humaine avec des mouvements articulés au niveau des bras et du cou (image 6).



Image 6 : Le « robot guerrier » de de Vinci.
https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo%27s_robot#/media/File:Leonardo-Robot3.jpg

D'autres inventeurs ont succédé à Léonard de Vinci, notamment Pierre Jaquet-Droz qui a créé trois robots de forme humanoïde capables d'écrire, de dessiner et de jouer de la musique au XVIIIème siècle (image 7).



Image 7 : « L'écrivain » de Jaquet-droz.
<https://www.timeandwatches.com/p/our-visit-to-ateliers-jaquet-droz.html>

B. L'ère moderne : des robots semi-automatisés au bloc opératoire

Les premiers robots au bloc opératoire dérivait des robots industriels. L'idée initiale était de créer des robots semi-automatiques avec pour objectif de remplacer l'homme au bloc opératoire et réduire l'erreur liée à l'imprécision.

Le premier robot à utilisation médicale fut le robot PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm) développé en 1978 par Victor Scheinmann. Les 6 degrés de liberté du bras

robotisé permettent des biopsies stéréotaxiques guidées par scanner pour les tumeurs cérébrales (image 8) ²⁵.



Image 8 : PUMA robot.
<https://grabcad.com/library/robot-puma-560>

Depuis 1988, les neurochirurgiens utilisent le neuromate ²⁶. Ce robot combine un bras robotisé et une station de planification du geste sous contrôle radiologique (image 9).

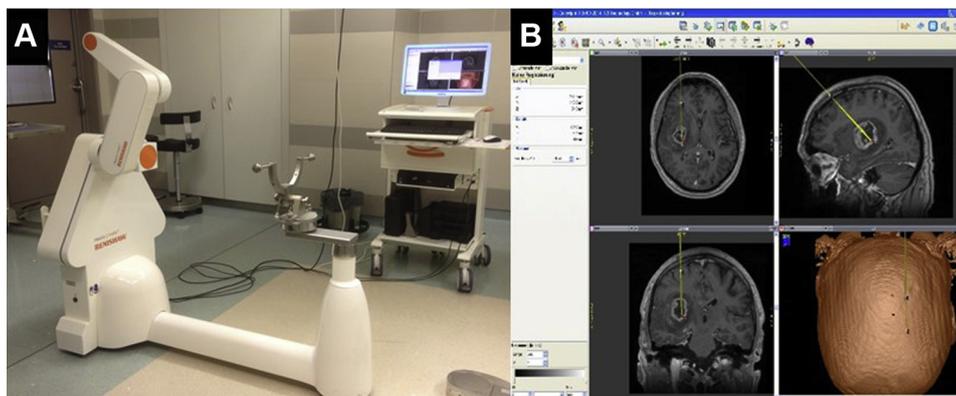


Image 9 : Neuromate robot ²⁶

Les chirurgiens orthopédistes ont utilisé à partir de 1991 le ROBODOC (Think Surgical, Inc., Fremont, CA) dans des indications d'arthroplasties de hanche et de genou afin d'augmenter la précision dans la mise en place des prothèses (image 10) ²⁷.



Image 10 : ROBODOC

https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2017ws/seminar/ir/doc/slides/NicolasPerezDeOlague-Autonomous_Surgical_Robots.pdf

Le PROBOT est entré sur le marché en 1995 et permet des résections de prostate par voie endorectale automatique et guidée par l'image (image 11) ²⁸.

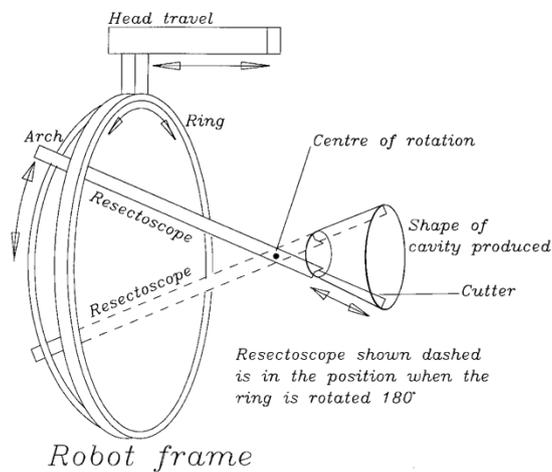


Image 11 : Principe de sécurité et de précision du robot PROBOT avec une rotation du rectoscope selon un arc de cercle créant une cavité conique ²⁸

C. Des robots outils

L'idée initiale de remplacer le chirurgien par un outil autonome a progressivement disparu de l'imaginaire et du fantasme scientifiques. Les innovations dans le domaine de la robotique se

sont recentrées sur l'aide à l'opérateur et sur la création d'outils chirurgicaux intelligents capables de réaliser avec plus de précision une tâche auparavant manuelle tout en conservant un contrôle et un guidage humains.

C'est dans cet esprit qu'a été développé le CT-bot²⁹ plateforme de robotique permettant des biopsies scanno-guidées d'une grande précision avec un travail sur la portabilité du système (image 12).



Image 12 : CT-bot.²⁹

Une autre illustration de cette approche est le développement d'une sonde d'échographie robotisée permettant de compenser le mouvement des organes afin de rester centré sur la zone d'intérêt, méthode très intéressante pour tout geste à visée diagnostique ou thérapeutique échoguidée³⁰.

Un dernier exemple est le robot Apollo (image 13), utilisé en urologie, pour réaliser des biopsies de prostate en stabilisant les mouvements du chirurgien³¹.

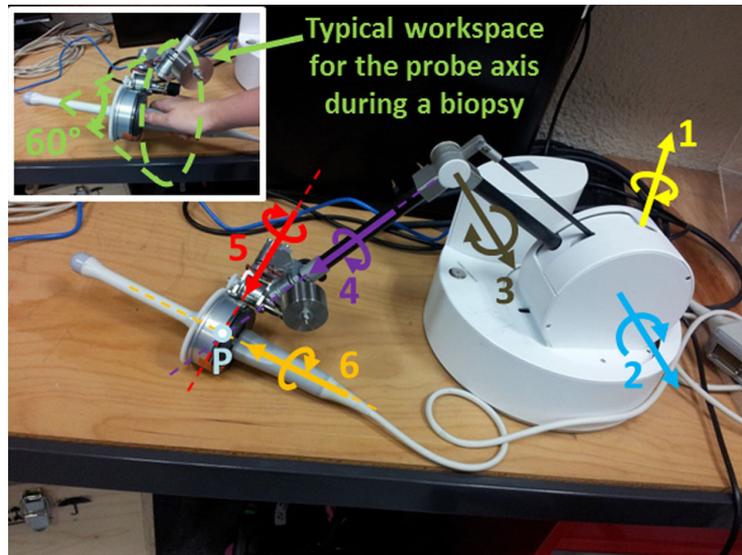


Image 13 : Sonde d'échographie endorectale co-manipulée par le chirurgien et le système Apollo ³¹

D. Des robots télécommandés

L'évolution du robot humanoïde au robot outil a amené au robot téléguidé qui ouvre la voie de la téléchirurgie. L'espace de travail est séparé en deux : un espace maître géré par le chirurgien et un espace esclave constitué du robot. La distance peut être de l'ordre de quelques mètres à plusieurs milliers de kilomètres.

Des robots ont été développés en chirurgie endovasculaire afin de diminuer l'exposition du chirurgien aux rayons X tout en conservant, voire améliorant la précision du geste : le système Magellan (image 14) ³² et le R-one mis au point en France par la société Robocath ont le marquage CE en 2019.



Image 14 : Robot Magellan avec la station de contrôle à distance de la salle d'angiographie disposant de plusieurs joysticks permettant la navigation en 3D du guide et du cathéter ³²

Le premier système robotisé développé spécifiquement pour les procédures de chirurgie abdomino-pelvienne a été AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) par ComputerMotion (Santa Barbara, Ca, USA) ³³. Ce système consistait en un bras automatisé pour contrôler la caméra (image 15).



Image 15 : Système ASEOP ³⁴

L'évolution de AESOP a été le robot ZEUS (image 16). Ce système présente côté patient deux bras instruments et 1 bras caméra. Côté chirurgien deux manettes permettent de contrôler les deux bras instruments, le bras caméra étant contrôlé par la voix du chirurgien. Ce robot a été l'un des premiers robot adaptés pour la chirurgie générale : des interventions de chirurgie viscérale, urologique, gynécologique et cardiaque ont été réalisées ³⁵.



Image 16 : Système ZEUS avec l'espace maître chirurgien et l'espace esclave patient ³⁵.

Le programme de développement de ZEUS se stoppe en 2003 suite au rachat de ComputerMotion par Intuitive Surgical.

III. Le robot Da Vinci

Intuitive surgical® a obtenu en 2000 par la FDA (Food and Drug Administration) l'autorisation de mise sur le marché de son robot généraliste télécommandé. Plusieurs générations et autant d'innovations technologiques ont été mises au point lors des 20 années suivantes. La première version du robot da Vinci présente trois bras robotisés. Le da Vinci S, mis au point en 2006, a un quatrième bras où se positionne un instrument pour rétracter ou exposer une structure

anatomique. En 2009, la version Si intègre une image en 3D HD et une deuxième console opérateur permettant à un chirurgien mentor de superviser un chirurgien novice ³⁴. Le da Vinci Xi (image 17) est disponible sur le marché en 2014 et présente d'importantes innovations par rapport au Si avec un chariot patient et des bras plus mobiles associés à une table d'intervention qui est couplée au robot. Ce nouveau système élargit le champ des indications potentielles avec la possibilité d'opérer dans plusieurs quadrants de l'abdomen sans modifier l'installation. Deux nouveaux modèles sont disponibles : le da Vinci X qui combine les innovations techniques des bras du Xi sans la mobilité du chariot patient, donc moins adapté pour la chirurgie multi-quadrants, mais avec un coût plus abordable et le da Vinci SP (Single Port).



Image 17 : Da Vinci Xi avec la console chirurgien, le chariot patient et le chariot de visualisation.

<https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems##>

Chapitre 2 : Chirurgie mini-invasive, robotique et pédiatrie

La chirurgie mini-invasive, développée par et pour les adultes, a été adoptée dans un second temps par les chirurgiens pédiatres. Pour des raisons de sécurité, de taille des instruments et d'adaptation des techniques de laparoscopie à l'enfant, les innovations en chirurgie pédiatrique sont toujours en retard par rapport à l'adulte. Nous allons tenter d'apporter des éléments d'explication dans ce chapitre.

I. Chirurgie mini-invasive et pédiatrie

A. Les débuts en pédiatrie

La figure 1 présente les dates des premières chirurgicales des interventions en laparoscopie et en laparoscopie-robot assistée chez l'adulte et chez l'enfant. Pour chaque intervention, nous renvoyons à la publication qui a suivi et que l'on retrouve en bibliographie. On remarque que le développement des techniques chirurgicales concerne d'abord l'adulte, puis leur adaptation en chirurgie pédiatrique. Cette figure montre également que le délai entre l'adulte et l'enfant est plus long en laparoscopie qu'en chirurgie robotique.

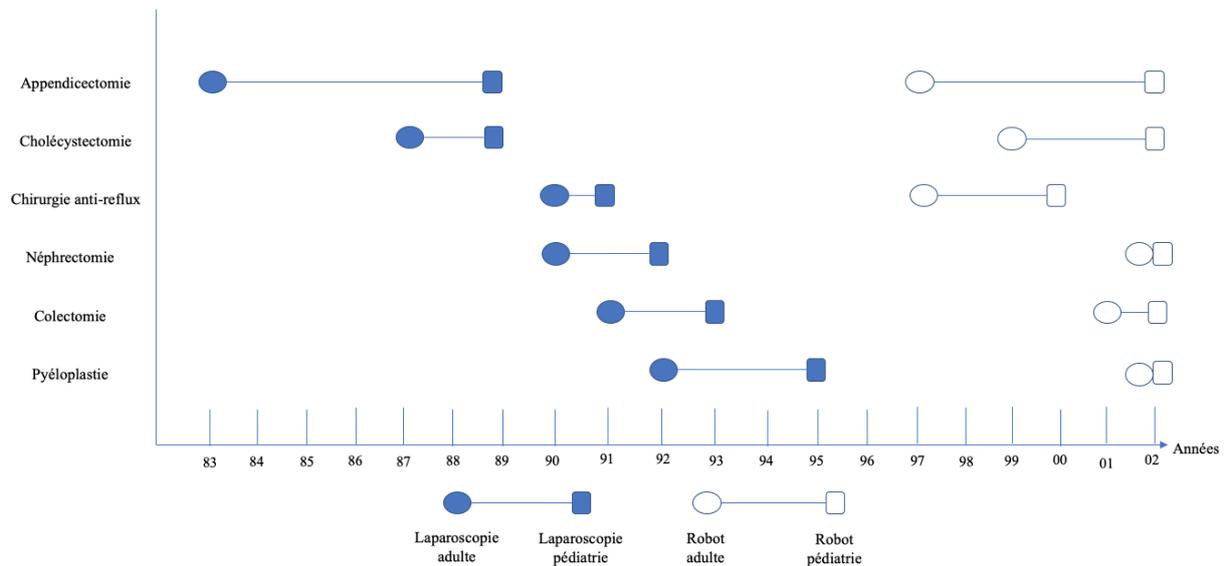


Figure 1. Premières chirurgicales chez l'adulte et l'enfant. Appendicectomie^{22,36-38}. Cholécystectomie^{23,39-41}. Chirurgie anti-reflux^{37,42,43}. Néphrectomie⁴⁴⁻⁴⁷. Colectomie^{41,48-50}. Pyéloplastie^{47,51-53}.

Que ce soit chez l'adulte ou chez l'enfant, la chirurgie mini-invasive a d'abord été utilisée à but diagnostique, puis pour la chirurgie ablative, et enfin pour la chirurgie de reconstruction⁵⁴. Un exemple intéressant est celui de la prise en charge des testicules non palpables. Dès 1976, il a été possible d'explorer un testicule non palpable bilatéral par laparoscopie⁵⁵. Puis dans un second temps, les techniques d'abaissement testiculaire par laparoscopie se sont développées^{56,57}.

Les procédures ablatives sont tentées au début des années 1990 chez l'enfant : la première néphrectomie par voie transpéritonéale en 1992⁴⁵ et par voie rétropéritonéale en 1993⁵⁸. Puis des procédures plus complexes de chirurgie de reconstruction ont été réalisées telles que la pyéloplastie chez l'enfant par voie transpéritonéale en 1995⁵². Il a fallu attendre 2001 pour que la première pyéloplastie par voie rétropéritonéale soit rapportée⁵⁹.

B. Rationnel de la chirurgie mini-invasive en pédiatrie

L'adaptation des techniques de chirurgie mini-invasive mises au point chez l'adulte à la chirurgie pédiatrique a pour but d'en faire bénéficier les enfants : un préjudice esthétique moindre, une récupération plus rapide, moins de douleurs post opératoires, un temps d'hospitalisation plus court.

L'enjeu en pédiatrie est d'autant plus important que les enfants ont une espérance de vie après la chirurgie plus longue que l'adulte donc un risque de séquelles augmenté. Les conséquences de l'acte chirurgical ne sont pas anodines, surtout chez des enfants porteurs de pathologie chronique qui seront réopérés. Il a par exemple été montré que la laparoscopie diminuait le risque d'occlusions sur bride post opératoire ⁶⁰.

L'aspect esthétique et notamment la taille des cicatrices sont également des éléments importants en chirurgie pédiatrique, à la fois pour les parents et pour l'enfant. Une question récurrente en consultation est la taille et la localisation de la cicatrice.

Dans un article publié en 2018, une équipe a décrit l'évolution des cicatrices de pyéloplastie et de réimplantation urétérale avec un recul moyen de deux ans et demi. La taille moyenne des cicatrices par voie ouverte passe de 4 à 6 cm contre 0,8 à 1,1 cm par voie laparoscopique ⁶¹. Même si le processus de cicatrisation est meilleur chez l'enfant que chez l'adulte, il ne faut pas sous-estimer l'importance de la représentation de son image corporelle. Ainsi une enquête menée en 2013 montrait que les parents et les enfants opérés de pyéloplastie, réimplantation urétérale ou agrandissement vésical, préféraient les cicatrices de l'approche laparoscopique robot-assistée à celles de chirurgie ouverte. Néanmoins les auteurs précisent que l'efficacité clinique passe avant le résultat cicatriciel pour la majorité des parents ⁶².

La durée d'hospitalisation est également plus courte en chirurgie mini-invasive chez l'enfant, ce qui permet un retour à domicile et dans son environnement social plus rapide. Ainsi une revue de littérature comparant appendicectomie par voie mini-invasive et par voie ouverte

comportant 10 essais et 1245 enfants a conclu à une différence significative en faveur de la voie laparoscopique concernant la durée d'hospitalisation ⁶³.

Le risque d'infections du site opératoire est également moins important chez les enfants opérés par voie mini-invasive. Ainsi une étude récente montre chez 440 enfants bénéficiant d'une coloproctectomie un taux plus faible d'infections du site opératoire dans le groupe opéré par laparoscopie ⁶⁴.

II. Robot et pédiatrie

A. En retard par rapport à la chirurgie de l'adulte

Le premier cas publié de chirurgie robotique pédiatrique est une fondoplicature gastrique chez un enfant de 10 ans en Allemagne ⁴³. Les premiers programmes de chirurgie robotique pédiatrique ont été développés aux Etats-Unis au début des années 2000 ⁴¹. La première pyéloplastie robot-assistée a lieu en mars 2002 ⁴⁷. Si les premières chirurgicales ont lieu peu de temps après les premières chez l'adulte (Figure 1), la chirurgie robotique pédiatrique tarde à s'étendre par la suite en pratique courante. Au Royaume Uni, en 2018, seuls deux centres de chirurgie pédiatrique ont développé un programme de robotique ⁶⁵.

Deux raisons essentielles expliquent le retard de développement de la chirurgie robotique en pédiatrie : le coût et la taille des instruments.

En effet le coût très élevé d'une plateforme de chirurgie robotique dans un bloc opératoire, un nombre d'indications validées en pédiatrie faible et un recrutement moins important sont autant de freins à la mise en place d'un programme de chirurgie robotique pédiatrique. Une étude australienne a montré qu'une intervention devait être réalisée plus de 140 fois par an au robot pour devenir pertinente d'un point de vue économique ⁶⁶.

Les instruments de robotique, mis au point initialement pour des patients adultes, ne sont pas adaptés aux enfants et aux nourrissons (image 18). L'objectif de l'entreprise Intuitive Surgical au cours du développement du système Da Vinci est de proposer une technologie généraliste

qui peut être utilisée par plusieurs spécialités chirurgicales. Il faut préciser que le développement d'instruments plus petits, spécifiquement dédiés à la chirurgie pédiatrique et néonatale, n'est pas leur priorité, la chirurgie pédiatrique étant une niche ⁶⁷.



Image 18 : Comparaison de taille entre un instrument de laparoscopie de 3mm, un instrument de robotique de 8mm et un bébé ⁶⁷

B. Situation actuelle

De plus en plus d'équipes pédiatriques ont accès à la chirurgie robotique en Europe et particulièrement en France. Deux centres français précurseurs, Tours et Limoges, ont largement contribué au développement de la chirurgie robotique pédiatrique dès le début des années 2000. Ces 2 équipes ont partagé une plateforme de robotique avec leurs collègues en urologie et gynécologie. Plus récemment, l'Hôpital Necker-Enfants Malades a développé le premier programme de chirurgie robotique multidisciplinaire dédié à la pédiatrie avec le robot Xi en 2016. En 2019, les hôpitaux parisiens Robert Debré et le Kremlin Bicêtre se sont également dotés d'un programme de chirurgie robotique pédiatrique en collaboration avec leurs collègues adultes.

Les deux indications majeures qui ont été retenues initialement sont la fondoplicature gastrique et la pyéloplastie ⁴¹. Deux méta-analyses ont démontré l'absence de différence significative pour

ces deux indications entre chirurgie ouverte, laparoscopie et laparoscopie robot-assistée en termes de résultats post opératoires ^{68,69}. Il est difficile d'effectuer des études médico économiques de coût-efficacité pour montrer l'intérêt du robot en pédiatrie.

En effet, la singularité de la pédiatrie repose sur une grande hétérogénéité des indications, avec un grand nombre d'interventions différentes, mais un faible volume d'activité. Il est donc difficile d'obtenir un nombre suffisant de procédures pour comparer les différentes voies d'abord (chirurgie ouverte, laparoscopie et robotique) et évaluer l'impact économique du robot. Cependant, des interventions complexes en chirurgie reconstructrice doivent pouvoir bénéficier des avantages techniques apportées par la technologie robotique ⁶⁷. Des interventions telles que des portoentérostomies selon Kasai ⁷⁰ ou des iléocystoplasties d'agrandissement avec appendicovésicostomie selon Mitrofanoff ⁷¹ ont été réalisées.

Au cours des 20 premières années de développement de la chirurgie robotique pédiatrique, les principales interventions, qui ont été la fondoplicature et la cholécystectomie (chirurgie viscérale), sont maintenant réalisées en urologie (pyléoplastie et réimplantation urétérale) ⁷². Des études pédiatriques conséquentes ont été publiées, notamment une série de 300 réimplantations urétérales extra-vésicales ⁷³.

La démonstration est faite que l'approche robotique est faisable et sûre chez l'enfant. La limite reste l'absence d'essais cliniques prospectifs randomisés comparant laparoscopie robot-assistée, laparoscopie et voie ouverte.

Chapitre 3 : Chirurgie mini-invasive, robotique et oncologie pédiatrique

I. Tumeurs pédiatriques

A. Épidémiologie

L'incidence globale des cancers pédiatriques en Europe est de 139 par million d'enfants ⁷⁴. En France, on compte 2000 nouveaux cas par an. Le cancer reste la deuxième cause de mortalité chez l'enfant après les accidents, même si les taux de guérison ont progressé.

Tout âge confondu, les trois étiologies principales sont les leucémies (34.1%), les tumeurs du système nerveux central (22.6%) et les lymphomes (11.5%) ⁷⁵. Les tumeurs solides restantes (tumeurs rénales, tumeurs du système nerveux sympathique, tumeurs hépatiques, sarcomes, tumeurs germinales malignes, tumeurs osseuses et les rétinoblastomes) représentent 30% des cas de cancers de l'enfant. Les types de cancer varient selon l'âge des patients (figure 2).

Les neuroblastomes (7,6%) et les néphroblastomes (5,5%) sont les deux tumeurs solides extra-cérébrales les plus fréquentes. Les hépatoblastomes, les rétinoblastomes et les neuroblastomes sont les tumeurs associées avec l'âge médian de diagnostic le plus bas. L'incidence des tumeurs germinales malignes connaît deux pics : avant deux ans et à l'adolescence ⁷⁵. Les tumeurs rénales occupent une place importante jusqu'à l'âge de 10 ans puis deviennent plus rares, avec un âge médian de diagnostic de néphroblastome de 38 mois ⁷⁶.

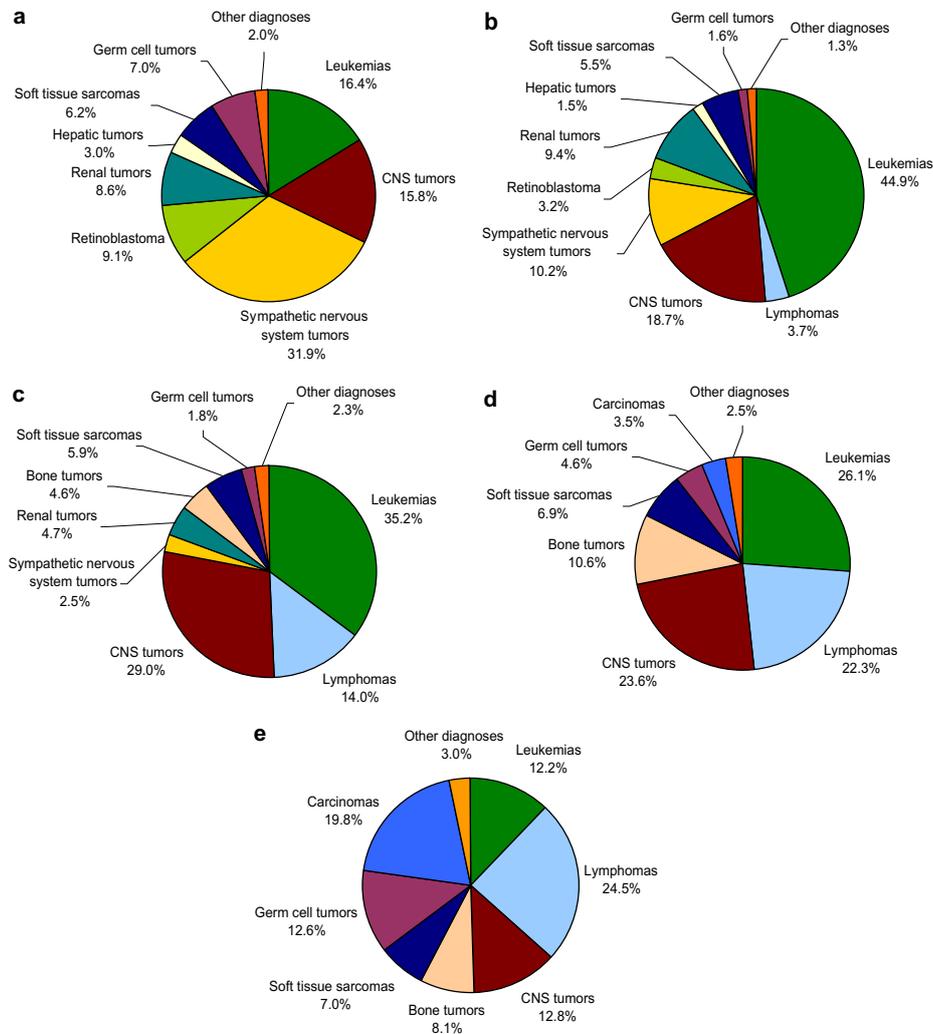


Figure 2. Répartition des cancers selon l'âge : (a) < 1 an ; (b) 1 – 4 ans ; (c) 5 – 9 ans ; (d) 10 – 14 ans ; (e) 15 – 19 ans. ⁷⁵

B. Caractéristiques des cancers pédiatriques

Les cancers de l'enfant n'ont pas le même type histologique que les cancers de l'adulte. Avant l'adolescence, les carcinomes représentent seulement 1,5% des tumeurs. La majorité des tumeurs solides pédiatriques extra-cérébrales sont d'origine embryonnaire (neuroblastomes, rétinoblastomes, néphroblastomes, médulloblastomes, rhabdomyosarcomes embryonnaires, tumeurs germinales malignes). Les tumeurs embryonnaires reproduisent l'aspect du développement embryonnaire avec des contingents plus ou moins différenciés.

Dans les carcinomes de l'adulte, l'exposition à des facteurs de risque tels que le tabac ou l'alcool sont bien connus. Pour les tumeurs pédiatriques, les étiologies sont le plus souvent inconnues,

très peu de facteurs de risque exogènes ou environnementaux mis à part quelques virus tels que le VIH ou EBV sont reconnus. Les différents types de cancer ont des incidences variables selon l'origine géographique ou ethnique, liée à une prédisposition génétique dans la tumorigénèse⁷⁷. Des syndromes familiaux prédisposant au cancer ont été mis en évidence. L'exemple du néphroblastome est intéressant avec une mutation du gène WT1 retrouvée dans les Denys-Drash et WAGR⁷⁸. La détection de la mutation chez un sujet permet d'organiser une surveillance adaptée.

Les caractéristiques tumorales en biologie moléculaire sont essentielles du point de vue thérapeutique et pronostique. En effet, connaître les altérations génétiques tumorales spécifiques permet de développer des thérapies ciblées.

Une étude prospective récente publiée en 2017 a mis en évidence chez 75 enfants présentant des tumeurs solides en récurrence ou résistantes au traitement initial 42 potentielles cibles génétiques. Ce protocole a abouti au traitement de 14 enfants par thérapie ciblée⁷⁹.

Sur le plan pronostique, un exemple intéressant est celui de l'amplification de l'oncogène N-MYC dans la prise en charge du neuroblastome⁸⁰.

Le taux de survie globale des cancers chez l'enfant est de 82% à 5 ans.

C. Place de la chirurgie

La chirurgie intervient à 3 niveaux dans la prise en charge des tumeurs pédiatriques : à but diagnostique (biopsies chirurgicales), à but pronostique (staging) et à but curatif (résection tumorale).

La plupart des tumeurs nécessitent une biopsie à visée diagnostique. La biopsie doit être réalisée à l'aiguille fine ou au trucut pour diminuer le risque de dissémination. Parfois la tumeur n'est pas accessible à une biopsie percutanée et nécessite une chirurgie pour prélever un échantillon avec un intérêt des procédures mini-invasives.

Une tumeur du rein d'aspect typique à l'imagerie chez un enfant entre 2 et 5 ans peut être considérée comme un néphroblastome. Ce type de tumeur ne nécessite pas de confirmation histologique avant de débiter la chimiothérapie. L'objectif est d'éviter un geste invasif devant un tableau typique et d'éviter une dissémination tumorale ⁸¹. Un autre exemple est celui des masses surrenaliennes néonatales qui, dans la majorité des cas, régressent spontanément sans traitement et peuvent être surveillées sans confirmation histologique.

Les classifications pronostiques sont propres à chaque type tumoral, mais la résecabilité chirurgicale de la tumeur primitive est un élément majeur du staging.

Dans la prise en charge du neuroblastome, la classification INRGSS (International Neuroblastoma Risk Group Staging System) permet de rechercher des IDRFs (Image Defined Risk Factors) sur l'imagerie pré-opératoire afin d'anticiper des difficultés potentielles au cours de la résection chirurgicale ⁸². La présence d'un IDRF classe la tumeur en stade L2 et prédit une chirurgie difficile (figure 3) ⁸³.

Stage	Description
L1	Localized tumor confined to one body compartment and not involving vital structures as defined by IDRFs*
L2	Locoregional tumor with one or more IDRFs
M	Distant metastases (excluding MS)
MS	Metastatic disease in a child <18 months with metastases confined to skin, liver, and/or marrow

*IDRFs (image defined risk factors): ipsilateral tumor extension within two body compartments, infiltration of adjacent organs/structures, encasement of major vessels or brachial plexus, compression of the trachea or central bronchi, infiltration of the porto-hepatic or hepato-duodenal ligament, infiltration of the costo-vertebral junction between T9 and T12, tumors crossing the sciatic notch or invading the renal pedicle, extension of tumor to the base of the skull, intraspinal tumor extension (>1/3 of spinal canal invaded, leptomeningeal space obliterated, or spinal cord MRI signal abnormal)

Figure 3. classification INRGSS ⁸¹

Le staging du néphroblastome, basé sur la résection chirurgicale (figure 4), est déterminé en post opératoire ⁸⁴.

Stage I

- Tumor limited to the kidney and completely resected
- Intact renal capsule
- No previous rupture or biopsy
- Renal sinus vessels not involved
- No evidence of tumor at or beyond margins of resection

Stage II

- Tumor completely resected
- No evidence of tumor at or beyond the margins of resection
- Tumor extends beyond the kidney, as evidenced by one of the following:
 - Penetration through the renal capsule
 - Extensive invasion of the soft tissue of the renal sinus
 - Blood vessels within the nephrectomy specimen outside the renal parenchyma, including those of the renal sinus, contain tumor

Stage III

- Residual nonhematogenous tumor confined to the abdomen is present after surgery as evidence by any one of the following:
 - Involvement of lymph nodes within the abdomen or pelvis
 - Penetration through the peritoneal surface
 - Tumor implants on the peritoneal surface
 - Tumor present at the margin of surgical resection
 - Tumor not resectable because of local infiltration into vital structures
 - Biopsy of tumor prior to removal of kidney
 - Tumor spillage of any degree or localization occurring before or during surgery
 - Tumor removed in greater than one piece

Stage IV

- Hematogenous metastases (lung, liver, bone, brain, etc.)
- Lymph node metastases outside the abdominopelvic region

Stage V

- Bilateral renal involvement at diagnosis
- Each side should be separately staged according to the above criteria

Figure 4. Staging des tumeurs rénales ⁸⁴

Les tumeurs germinales malignes du testicule ou de l’ovaire sont également évaluées sur le plan pronostique en post-opératoire selon les classifications du Children’s Oncology Group ⁸⁵.

Le rôle essentiel de la chirurgie dans la prise en charge des tumeurs de l’enfant est la résection de la tumeur primitive et/ou des localisations secondaires métastatiques. Cette résection suit des règles générales communes à l’oncologie, mais également des spécificités pour chaque type de tumeur.

Les marges de résection doivent être saines sans dissémination tumorale. Ces règles sont particulièrement importantes pour les néphroblastomes, les tumeurs germinales malignes, les carcinomes cortico-surrénaux ou les tumeurs de Frantz ⁸¹. Ces tumeurs doivent donc être

réséquées en mono-bloc sans fragmentation ce qui implique une extraction adaptée à la taille de la tumeur à la fin de la procédure mini-invasive.

La néphrectomie totale est encore le traitement de référence pour les néphroblastomes chez l'enfant. La néphrectomie partielle, en vue de préserver le parenchyme rénal et d'éviter l'insuffisance rénale, est recommandée chez les patients avec des tumeurs bilatérales ou en cas de syndrome de prédisposition ⁸⁶. Deux questions se posent désormais face à un néphroblastome unilatéral chez un enfant non syndromique : Chirurgie par voie ouverte ou mini-invasive ? Néphrectomie partielle ou totale ? De plus en plus d'études montrent la faisabilité des procédures mini-invasives pour néphroblastome unilatéral chez l'enfant sans sur-risque de récurrences locales ⁸⁷. Les contre-indications à la chirurgie mini-invasive selon le protocole Umbrella (SIOP 2014) sont l'atteinte des structures extra-rénales, une tumeur s'étendant au-delà du bord de la vertèbre ipsilatérale et la présence d'un thrombus dans la veine rénale ou dans la veine cave ⁸⁸. Des résections robot-assistées chez l'enfant ont été réalisées ^{9,89}. D'après le protocole Umbrella, les néphroblastomes unilatéraux de moins de 300mL avec un parenchyme sain autour et sans atteinte ganglionnaire sont éligibles à une néphrectomie partielle.

En revanche, le neuroblastome peut être fragmenté au cours de son exérèse, plus ou moins complète selon le profil génomique et la localisation. La résection complète ou non des neuroblastomes de haut risque est débattue ^{90,91}. Certaines localisations peuvent rendre la résection complète difficile avec des risques de complications chirurgicales et de sacrifice d'organe. D'autres tumeurs bénignes peuvent également être fragmentées : les thymomes, les phéochromocytomes ou les ganglioneuromes.

D. Autres traitements

La chimiothérapie est un aspect essentiel dans la prise en charge thérapeutique des tumeurs solides pédiatriques.

Les protocoles varient selon les pays. Pour les néphroblastomes, la chimiothérapie dans le cadre du protocole de la SIOP est néo-adjuvante alors qu'aux Etats-Unis, la chirurgie première est la règle.

30% des enfants traités pour un cancer reçoivent de la radiothérapie. Les cancers nécessitant une irradiation sont par ordre de fréquence décroissante : les tumeurs cérébrales, les neuroblastomes, les sarcomes d'Ewing, les maladies de Hodgkin, les sarcomes des parties molles, les rhabdomyosarcomes et les néphroblastomes ⁹². Un tiers des enfants atteints de neuroblastomes (correspondant aux neuroblastomes de haut risque) sont irradiés. Quant aux néphroblastomes, l'irradiation est réservée en post-opératoire aux tumeurs stade III et IV.

Les autres moyens thérapeutiques sont l'immunothérapie (dinutuximab dans le neuroblastome de haut risque, récidivant ou réfractaire), les agents différentiants (acide rétinoïque également pour le neuroblastome de haut risque) et les thérapies ciblées qui sont des thérapies innovantes dans le traitement des tumeurs solides pédiatriques.

II. Apports de la chirurgie mini-invasive et de la chirurgie robotique

A. Avantages techniques chez l'adulte et l'enfant

La chirurgie laparoscopique robot-assistée présente de nombreux avantages par rapport à la laparoscopie classique ou à la chirurgie par voie ouverte.

a) La vision

La console du système da Vinci® offre une expérience immersive avec une vision magnifiée en 3D HD. L'opérateur a l'impression d'évoluer à l'intérieur du patient avec une perception unique de visualisation des différents plans en profondeur.

Le mode Firefly® sur la console permet de visualiser par fluorescence le vert d'indocyanine injecté en intraveineux. Cette technique est utilisée chez l'adulte pour la résection de tumeurs rénales corticales. Elle permet d'identifier clairement l'artère et la veine rénale, et surtout de

différencier la tumeur en hypofluorescence par rapport au reste du parenchyme rénal après clampage (image 19) et donc d'assurer des marges de résection saines ⁹³.

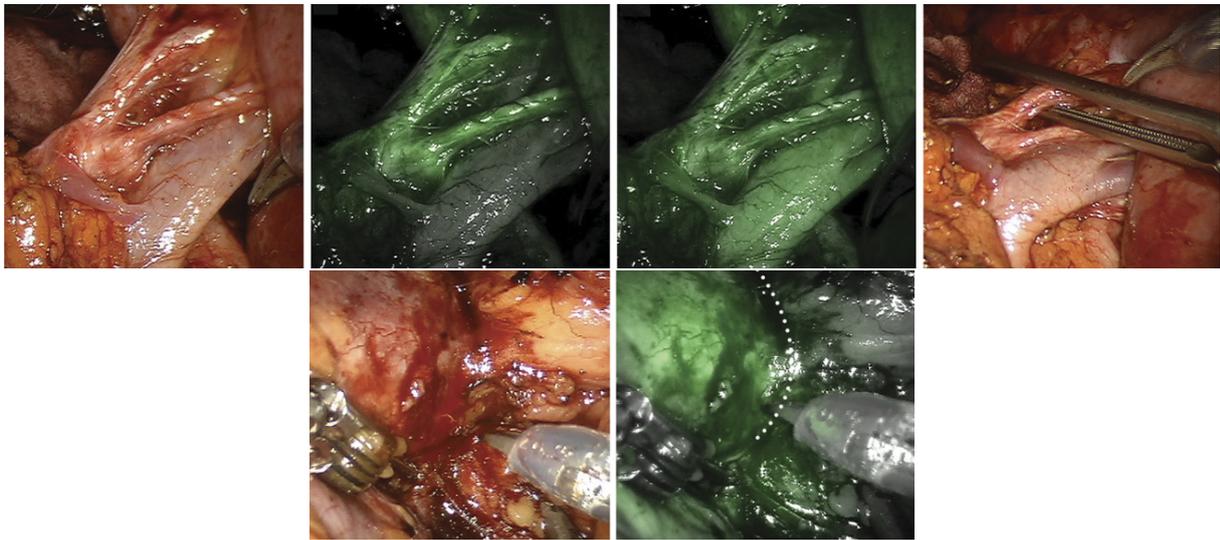


Image 19 : Mise en évidence par fluorescence de l'artère puis de la veine rénale permettant un clampage électif du pôle supérieur rénal. Mise en évidence de la tumeur qui ne fixe pas le vert d'indocyanine ⁹³

Cette technique peut être utilisée pour les néphrectomies partielles pour néphroblastome.

b) Le contrôle de la caméra

Un autre avantage important par rapport à la laparoscopie classique est l'autocontrôle de la caméra par le chirurgien à la console. Celui-ci n'est plus dépendant de son aide pour cibler la région opératoire et peut donc anticiper ses propres mouvements et ses actions pour déplacer la caméra. La caméra contrôle également automatiquement la focalisation.

c) Les bras robotisés

Les bras automatisés du robot permettent d'éliminer les tremblements pour gagner en précision. Les instruments ont été conçus pour optimiser leurs degrés de liberté facilitant la dissection, la suture et l'exposition. Ces atouts du robot permettent d'opérer avec une sécurité accrue, notamment les phéochromocytomes qui nécessitent une mobilisation minimale lors de la dissection pour garder une stabilité hémodynamique ⁸⁹.

d) L'ergonomie et le confort du chirurgien

Les conditions ergonomiques d'intervention sont meilleures en chirurgie robotique surtout chez les petits enfants ⁹⁴. Un travail mené par Lee et al, utilisant des enregistrements électromyographiques de surface montre une activité musculaire moins importante lors d'une chirurgie robotique. La charge mentale, évaluée grâce à un questionnaire prenant en compte performance et frustration, est également moins importante ⁹⁵. Une autre étude a analysé les performances de 32 chirurgiens experts en chirurgie laparoscopique en évaluant effort musculaire, performance, précision et effort mental. Les résultats de tâches simples réalisées en laparoscopie classique et au robot sont en faveur de la chirurgie robotique ⁹⁶. La position prise par le chirurgien à la console du robot est adaptable selon sa taille, ce qui limite l'apparition de troubles musculo-squelettiques ⁹⁷.

e) La téléchirurgie

Le système da Vinci fait partie de la génération des robots télécommandés avec un espace maître correspondant à la console avec l'opérateur et un espace esclave correspondant à la table d'intervention, au patient et aux bras du robot, séparés physiquement. La distance séparant les deux espaces peut varier de quelques mètres dans une salle classique de bloc opératoire à plusieurs milliers de kilomètres. L'exemple le plus médiatisé est celui de la cholécystectomie robot-assistée réalisée à Strasbourg en 2001 par Pr Marescaux qui opérait depuis une console à New York ⁹⁸. L'intérêt principal est celui de s'affranchir de la distance géographique entre un chirurgien expert et l'intervention. Cette possibilité technologique permet d'obtenir une aide éclairée sur un cas complexe. La téléchirurgie pourrait avoir un intérêt également dans les zones de conflit ou de catastrophes naturelles pour aider des chirurgiens militaires ou humanitaires dans leurs interventions. Le but n'est pas seulement de réaliser l'intervention à la place du chirurgien sur place mais bien de l'accompagner dans une démarche de formation, en réduisant notamment la learning curve. ⁹⁹.

B. Une meilleure prise en charge globale

Les avantages de la chirurgie mini-invasive par rapport à la chirurgie par voie ouverte sont désormais bien connus : réduction des douleurs post-opératoires, du temps d'hospitalisation, rançon cicatricielle moindre, diminution des occlusions sur bride. Ce qui permet, en oncologie, que la chimiothérapie adjuvante soit reprise rapidement.

Le débat actuel réside dans la comparaison entre les résultats de la laparoscopie classique face à la laparoscopie robot-assistée. Très peu d'études sont disponibles chez l'adulte et encore moins chez l'enfant. En 2017, une méta-analyse étudiant sur 350 patients les résultats de thymectomie pour thymome ou myasthénie n'a conclu à aucune différence significative ¹⁰⁰. Une étude récente japonaise a montré sur 330 gastrectomies robot-assistées pour cancer une morbidité à 30 jours significativement inférieure par rapport à une série rétrospective laparoscopique ¹⁰¹. Dans le cadre de la chirurgie hépatique, une méta-analyse regroupant 9 études et 750 patients ayant bénéficié de résection hépatique pour tumeur, n'a pas montré de différence significative entre les deux techniques. Néanmoins un plus grand nombre de résections hépatiques majeures ont été réalisées au robot ¹⁰². Les résections tumorales au robot n'ont pas montré pour l'instant de meilleurs résultats par rapport à celles qui sont déjà réalisées en laparoscopie. En revanche, la chirurgie robotique permet de réséquer des tumeurs qui du fait de leur taille ou de leur localisation ne sont pas résécables en laparoscopie simple. Il est important de préciser qu'une étude récente a montré que les résultats d'hystérectomies pour cancer du col réalisées par voie mini-invasive (robotique ou laparoscopique) étaient moins bons sur le plan de la survie sans récurrence et de la survie globale que par voie ouverte

¹⁰³.

C. Challenges

L'utilisation de la chirurgie robotique chez l'enfant présente des spécificités propres à la pédiatrie.

a) La taille

Le premier challenge est l'inadéquation de taille entre le système da Vinci et l'enfant. En effet, l'espace de travail intra abdominal ou intra thoracique chez les jeunes enfants peut être inadapté à l'utilisation du robot avec des instruments trop longs, prenant trop de place dans le champ de vision du chirurgien et perdant leurs avantages en termes de degrés de liberté ¹⁰⁴. L'exiguïté de la zone de travail peut aussi entraîner des conflits entre les bras du robot, rendant son utilisation impossible. Cette inadéquation de taille peut être un motif de conversion. Ballouhey *et al* a montré sur 178 chirurgies robotiques un taux significativement plus important de conversions dans le groupe d'enfants pesant moins de 15 kgs comparé à celui des enfants pesant plus de 15 kgs ¹⁰⁵.

Ces considérations sont encore plus importantes quand il s'agit de respecter les principes de base en chirurgie oncologique pour éviter la dissémination tumorale et obtenir des marges saines.

Meehan *et al* a décrit son expérience chez 45 enfants de moins de 10 kg qui ont bénéficié d'une intervention robot-assistée ¹⁰⁶. L'intervention la plus réalisée était la fondoplicature gastrique. Seulement deux procédures (deux résections de neuroblastome) correspondaient à de la chirurgie oncologique. La principale cause de conversion était l'espace de travail restreint et plus particulièrement lors des thoracosopies robot-assistées (4 conversions sur 5 au total). Les solutions avancées par Meehan *et al* pour permettre l'utilisation en sécurité du robot chez les enfants de moins de 10 kgs sont multiples, la première est la surélévation de l'enfant de plusieurs centimètres au-dessus de la table d'intervention pour limiter les conflits entre les bras

du robot. La distance entre chaque trocar doit être plus importante qu'en laparoscopie pour améliorer la mobilité des instruments en intra abdominal ou thoracique. Concernant la profondeur des trocars, il ne faut pas suivre les recommandations de Da Vinci adaptées à l'adulte et enfoncer les trocars jusqu'à ce que la ligne noire épaisse soit visible à la caméra mais les retirer légèrement pour gagner 1,5 à 2 cm de mobilité.

Finkelstein *et al* a montré sur une série de 45 enfants âgés de moins de un an que le nombre de collisions des bras du robot en per opératoire était statistiquement lié à la distance entre les deux épines iliaques antéro-supérieures pour les procédures sur le bas appareil urinaire et la distance xipho-pubienne pour les procédures sur le haut appareil urinaire ; et que ces mesures n'étaient pas corrélées à l'âge et au poids ¹⁰⁷.

Un autre challenge concerne l'éventualité d'une conversion avec nécessité de dé docker le robot en urgence. La grande taille et l'espace occupé par le robot et les bras gênent l'accès à un enfant de petite taille. Pour faire face à cette éventualité et limiter la perte de temps, les équipes doivent être préparées et suivre un protocole de dé docking en urgence pré établi ¹⁰⁸. Le rôle de l'assistant opératoire en stérile auprès de l'enfant est également essentiel dans ces situations critiques ¹⁰⁹.

b) Les principes oncologiques

En chirurgie oncologique pédiatrique, l'objectif est d'obtenir des marges saines et d'éviter la dissémination de la tumeur.

Les détracteurs de la chirurgie robotique utilisent souvent l'argument de l'absence de retour de force pour émettre des doutes sur la sécurité de l'utilisation du robot. Il est en effet impossible de palper et de sentir la tumeur et donc plus difficile de décider des limites exactes de résection.

Un case report de rupture tumorale per opératoire en intra péritonéale d'un sarcome d'Ewing/tumeur neuroectodermique primitive de localisation surrénalienne illustre cet impératif et les conséquences néfastes ¹¹⁰. Les auteurs décrivent une erreur diagnostique,

pensant opérer une tumeur bénigne. Le traitement de l'adolescente a dû être complété par 7 cures de chimiothérapie et une irradiation abdominale in toto. Dans une méta-analyse de 40 résections tumorales robot-assistée, aucun autre cas de rupture n'est décrit ¹¹¹. Cet exemple illustre le fait que les cas doivent être discutés en réunion de concertation pluridisciplinaire avec les oncologues pédiatres ¹¹². La conversion ne doit pas être synonyme d'échec. L'extraction d'une tumeur en bloc qui ne doit pas être morcelée, comme le néphroblastome, peut se faire par une incision de Pfannenstiel.

Concernant le risque de métastases sur trajet de trocart, aucun cas pédiatrique n'est rapporté dans la littérature ¹¹¹. Chez l'adulte une méta analyse en 2013 a mis en évidence 5 cas de métastases sur trajet de trocart, taux comparables à la laparoscopie ¹¹³. Les mécanismes de formation de ces lésions secondaires ne sont pas encore complètement connus. La mobilisation tumorale et le pneumopéritoine pourraient favoriser ces lésions.

c) La courbe d'apprentissage

Une des spécificités de la chirurgie pédiatrique est la diversité des indications opératoires. La solution proposée par l'équipe de Meehan est de réaliser au robot toutes les interventions de type cholécystectomie et fondoplicature gastrique pour lesquelles la chirurgie robotique apporte peu d'avantages par rapport à la chirurgie laparoscopique classique, mais qui permettent d'accélérer la courbe d'apprentissage ⁴¹. A titre d'exemple, il y a en France 160 nouveaux cas de néphroblastomes. Compte tenu du grand nombre de centres prenant en charge ces enfants, la formation d'un chirurgien au robot en oncologie pédiatrique sera longue.

d) Durée opératoire

Un autre challenge est le temps opératoire. Une nouvelle technologie dans une salle d'intervention impose toujours un temps d'adaptation pour l'ensemble du personnel du bloc opératoire. L'utilisation du robot da Vinci entraîne un temps supplémentaire d'installation du matériel par rapport à une intervention par laparoscopie ou par voie ouverte. En 2003, une

étude a montré une différence significative sur les cholécystectomies avec un temps de préparation du robot (drapage stérile, mise en place du robot, mise en place des trocars) qui augmentait sensiblement la durée opératoire totale ¹¹⁴. En 2009, Ploussard et al ont comparé 83 prostatectomies robot à 205 laparoscopies. Malgré un temps d'installation plus long, le temps global d'une prostatectomie au robot était significativement inférieure dans une équipe entraînée ¹¹⁵.

e) Un dispositif couteux

Le coût du système da Vinci semble un frein à son utilisation par certaines équipes pédiatriques. Une étude sud-américaine a montré la difficulté à développer la chirurgie robotique pédiatrique à cause du prix d'achat puis de sa maintenance ¹¹⁶. Une solution à envisager est le partage du robot avec les spécialités adultes pour amortir les coûts sur plusieurs services. Une étude récente sur la prise en charge chirurgicale du cancer de l'endomètre a montré qu'en dehors du prix d'achat initial du robot, le cout global des 30 jours péri-opératoires était inférieur en chirurgie robotique par rapport à la voie ouverte ¹¹⁷. Les coûts pour le patient qui sont très différents selon les systèmes de santé. Une étude américaine a montré sur un échantillon de 15893 patients pris en charge chirurgicalement pour des cancers que les coûts à la charge du patient étaient plus élevés en chirurgie ouverte qu'en chirurgie robotique, principalement en lien avec des temps d'hospitalisation plus longs ¹¹⁸.

Chapitre 4 : Article

The French nationwide experience in pediatric robotic oncology. Lessons learned.

T.Blanc^{1,2,3*}, P.Meignan^{1,4*}, Q.Ballouhey⁵, L.Pio^{1,2}, C.Capito¹, C.Harte⁶, L.Galmiche-Rolland⁷, V.Minard⁸, D.Orbach⁹, C.Muller^{1,2}, K.Braik⁴, A.Binet⁴, Y.Heloury^{1,2}, L.Fourcade⁵, H.Lardy⁴, S.Sarnacki^{1,2}

*These authors contributed equally to this work

1 Department of Pediatric Surgery and Urology, Hôpital Necker-Enfants Malades, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Paris, France

2 Université de Paris Cité, Paris, France

3 INSERM U1151-CNRS UMR 8253, Université de Paris, Institut Necker-Enfants Malades, Département «Croissance et Signalisation», Hôpital Necker-Enfants Malades, Paris, France

4 Department of Pediatric Surgery, Hôpital Clocheville, 49 boulevard Béranger, 37044, Tours, France

5 Department of Pediatric Surgery, Hôpital des Enfants, 8 avenue Dominique Larrey, 87042, Limoges, France

6 Department of Pediatric Anesthesia, Hôpital Necker-Enfants Malades, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Paris, France

7 Department of Pathology, Hôpital Necker-Enfants Malades, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Paris, France

8 Department of Oncology for Child and Adolescents, Gustave Roussy, Cancer Center, Paris, France

9 Department of Pediatric Oncology, Oncology Center SIREDO (Care, Innovation, Research for Children, Adolescents and Young Adults with Cancer), Institut Curie, Paris, France

Correspondance

Pr Sabine Sarnacki MD PhD

Department of Pediatric Surgery and Urology

Hôpital Necker-Enfants Malades, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

149 Rue de Sèvres, 75015 Paris, France

sabine.sarnacki@aphp.fr

+ 33 1 44 49 58 57

Introduction

Open surgery is the gold standard for resection of pediatric tumors. In the International Society of Pediatric Oncology (SIOP) protocol, open total nephrectomy, preceded by neoadjuvant chemotherapy ¹, is the gold standard for therapy.

However, mini-invasive surgery (MIS) has been developed since the beginning of 2000 ². Oncological principles used in an open approach to avoid local recurrence (R0 resection, careful manipulation of the tumor, lymph node sampling) have to be reproduced in MIS in order to maintaining excellent oncological outcomes ^{3,4}. In 2010 the International Pediatric Endosurgery Group (IPEG) provided guidelines for surgical treatment of adrenal masses in children, recommending laparoscopic approaches ⁵.

Robotic-assisted laparoscopic surgery adds advantages to laparoscopic surgery, such as 3D vision, seven degrees of freedom, tremor filtration, and precise camera control ⁶. Whereas the use of robotics in adult oncology has become commonplace, the indications in pediatric oncological surgery are still controversial ⁷. No recommendations are available to control the use of robotic surgery in pediatric oncology ⁸.

The objectives of this study were (1) to describe a large multicentric series of pediatric patients with abdominal, thoracic and pelvic tumors removed by robotic-assisted surgery; (2) to analyze the results according the age, weight, localization and pathology; and (3) to provide data that contribute to careful patient selection and to clarify the pros and cons of robotic-assisted surgery in pediatric oncology.

Methods

Robotic-assisted tumor resections were performed by seven senior surgeons in three different university children hospital. Two teams started their robotic experience in the 2008, sharing a system with the adult urologists (Da Vinci S and Si Surgical System). The third center launched its multidisciplinary pediatric robotic program in 2016 (Da Vinci Xi Surgical System).

This retrospective analysis of prospectively collected data received approval from institutional review boards and an independent ethics committee (Comité de Protection des Personnes, CPP Ile de France VII). The sponsor was Assistance Publique—Hôpitaux de Paris (APHP, Clinical Research and Innovation Delegation) and this project was funded by a grant from Necker Hospital. It is registered with the ClinicalTrials.gov identifier NCT03274050.

At diagnosis, the tumor extent was assessed with computerized tomography (CT) and/or magnetic resonance imaging (MRI), and MIBG scans in case of neuroblastic tumors (NB). IDRF status was retrospectively established both at diagnosis and after neoadjuvant chemotherapy for all locations regardless of the presumed origin of the NB.

Children were treated according to the ongoing International Pediatric Oncology Society (SIOP)-protocols and indication for surgery resulted from the multidisciplinary tumor board.

The indications for robotic-assisted surgery were based on the size and localization of the tumor, the appraisal of the surgical risk factors according to image analysis with the radiologists and the surgeon's experience.

Demographic data, imaging at diagnosis, neoadjuvant chemotherapy, presurgery imaging, surgical procedure, postoperative complications, pathological staging and subtype, adjuvant treatment, oncologic outcomes and follow-up were collected in a prospective database.

In order to better describe the proportion between the tumor volume and the patient's age, a ratio between ellipsoid tumor volume (ETV) ($\text{width} \times \text{length} \times \text{height} \times 0.52$) and estimated patient blood volume (EPBV) (75 mL/kg for children over the age of three months) was provided, a parameter directly correlated to the patient's age ⁹.

Pressure was maintained at 10–12 mmHg for abdominal and retroperitoneal procedures; < 4 mmHg for thoracic procedure.

The patient was placed in lateral position for thoracic procedure and for retroperitoneal approach as described earlier (Blanc et al) ¹⁰ and in supine position for abdominal procedure. For abdominal procedure, three robotic ports and 2 assistant ports were used in center #1 and #2 whereas four robotic ports and 1 Air seal assistant port (Conmed, Utica, NY, USA) were used in center #3 (Fig. 1).

The tumor was removed in an endoscopic bag and was exteriorized via the slightly enlarged optical port or via a Pfannenstiel incision.

Statistical Analysis

Data were expressed as medians and interquartile ranges (25th, 75th percentiles) for continuous variables, and as numbers and percentages for categorical variables.

Results

From 2008 to 2020, 87 tumors were resected during 81 procedures in 77 children (53 girls).

Thirteen procedures were performed in center #1, 3 in center #2 and 65 in center #3.

The median age was 8.2 years (3.6-12); the youngest was 5 months old. One third of the patients were less than 5 years old, one third between 5 and 11 years old and one third older than 11 years old.

The median weight was 24 kg (14-44.5) with the smallest weighing 5 kg. 10 children were less than 10 kgs.

64 procedures (79%) were resections by laparoscopy for abdominal (n=57; 70%) or pelvic tumor (n=7;9%). The other ones were resections by retroperitoneoscopy (n=4; 5%) or by thoracoscopy (n=13; 16%).

Thirty-one children received pre-operative chemotherapy, all the children for Wilms and 9 for neuroblastoma (NBL).

The most common procedure was adrenalectomy (n=25) for endocrine tumors (n=13), neuroblastic tumors (n=11) and cystic lymphangiomas (n=1). Interestingly, five children had bilateral adrenalectomy, either synchronous (Carney complex n=2 and McCune Albright n=2) or metachronous (von Hippel Lindau n=1).

Kidney tumors were the second most common indication (n=20), including 5 partial nephrectomies via either a retroperitoneal approach (n=4) or a transperitoneal approach (n=1).

Seven WT out of twelve, scheduled for RAL total nephrectomy, had tumor extension beyond the ipsilateral border of the spinal column.

Twenty-six NBL were operated in 24 children. Eleven were located in adrenal regions (42%), 8 in thoracic localization (31%), 2 presacral (8%), 1 in the inter aortico cave space, 1 around the renal pedicle (adrenal healthy), 1 prerenal, 1 arising from the zuckerkindl ganglia and one

paravaginal. Seven patients had 8 IDRFs at the preoperative imaging workup (25%). IDRFs were contact with the renal pedicle in 6 cases, encasement of the renal pedicle in 1 case and encasement of the vena cava in 1 case.

The median volume of the tumors at surgery was 16.5 mL (5.2-57.6). The median ratio ETV/EPBV was 1.25% (0.33-2.94).

Surgery

Surgery was the first-line treatment in 50 children.

Median operative time for non-converted was 225 min (166-291) with a median console time of 177 min (118-237).

Due to renal parenchymal involvement, one child, the only Myc-N positif, had a nephrectomy associated to the adrenalectomy.

Seven conversions (9%) to open approach occurred (Table 1). Out of the seven WT with tumor extension beyond the ipsilateral border of the spinal column, one conversion occurred (sliding clip on renal vein). Out of the seven NB classified as L2, one conversion happened (difficult dissection).

No adjacent organ injury, no positioning-related injury and no injury due to robotic arms occurred.

The median length of hospitalization of the non-converted cases (n=75) was 3 days (2-4).

Six post-operative complications required an additional procedure under general anesthesia (Clavien-Dindo III) (Table 2).

Anatomopathology

The histological analysis of the tumors is summarized in Table 3.

Outcomes

In addition to the six post-operative complications requiring a procedure under general anesthesia, three patients needed an additional procedure (Table 4).

Out of the 77 children, neither recurrence nor medium term complications occurred. One female died from central nervous system metastases.

The median follow-up was 19.8 months (9.9–34.1 months).

Discussion

This robotic series is the largest known one in pediatric oncology. A meta-analysis published in 2014 reported case reports and two series of, respectively, 5 mediastinal and 10 abdominal tumors^{7,11,12}. In 2019 a study compared 10 children (part of this series) benefiting from robotic-assisted laparoscopic total and partial nephrectomy for renal malignant tumors to an open surgical approach group and showed no difference in long term results¹⁰. The previous largest series was published in 2017 by two teams represented in this study and described 12 robotic-assisted tumor resections with good results¹³.

Treating children with cancer lead to imperatively respect the principles of oncological surgery : no residual disease and no tumor spillage¹⁴. The development and utilization of a new technology should not question these rules. To limit that risk, all the cases of the series were discussed in tumor boards gathering surgeons, oncologists, radiologists. The decision to choose a robotic resection instead of an open or classic laparoscopic approach was made when it was considered safe for the child. Robotic cases were selected carefully according to tumor size and pathology. The mean ratio ETV/EPBV was 1.25% (0.33-2.94). The particularity of the series is the number of young children with low weight who have been benefited from robotic surgery. Indeed, ten resections were done in children weighing less than 10kgs and one third of the patients were less than 5 years old. Meehan *et al*¹⁵ described the use of the robot in a series of 45 children weighing less than 10kgs but only two procedures were oncological ones (neuroblastoma resections). This low proportion of young children in the literature is explained by the difference between the size of the robotic system and the child. The working space in the abdominal or thoracic cavities is not large enough with instruments too long and taking too much place in the vision field of the surgeon and reducing the degrees of freedom.

One of the advantages of the robotic system is the multidisciplinary aspect of its utilization. In this series we present a large variety of cases: thoracic, abdominal, retroperitoneal and pelvic interventions. This specificity is interesting in a general specialty such as pediatric surgery and it permits to share the use and the cost of this technology.

Concerning thoracic oncological surgery a meta-analysis regrouping 60959 patients comparing robotic and thoracoscopic lobectomy for non-small cell lung cancer showed no difference in morbidity ¹⁶. Our experience shows that thanks to the multiple degrees of freedom, the robotic system allows resection of thoracic masses maybe more easily than thoracoscopy in tiny and remote areas such as the contralateral mediastinum ¹⁷. Compared to the smooth movements of the robotic arms, the movements of the instruments of classic thoracoscopy could be more traumatic for the rigid thoracic wall and be responsible for postoperative pain after irritating the intercostal nerves. The other anatomical area benefiting from the robotic technical advantages for exposition and dissection of tumors is the pelvis.

Robotic surgery is often compared to laparoscopy or thoracoscopy as it is considered as another technique of mini-invasive surgery but is it not closer to open surgery? This question is important because it brings another one: could we expand the indications of mini-invasive surgery thanks to robotic surgery? The main limitation of robotic surgery and difference from open surgery is the absence of haptic feedback ¹⁸. This problem is counterbalanced by the seven degrees of freedom of each of the robotic arms which reproduce and even improve the hand movements of the surgeon with no tremor. The surgery of pheochromocytoma becomes safer with a minimal mobilization of the tumor and a better hemodynamics stability ¹³.

The other advantage of the robotic system is the auto-control of the robotic arms and camera by the main operator who does not have to ask an assistant to expose him. The da Vinci console offers an immersive experience to the surgeon with a magnified vision in 3DHD. The surgeon experiences the impression to work inside the patient with an incredible perception of depth and the different plans, which could be closer to open surgery compared to other techniques of mini-invasive surgery.

Seven WT out of twelve, scheduled for RAL total nephrectomy, did not respect the SIOP Umbrella criteria with a tumor expanding beyond the ipsilateral border of the spinal column ¹⁹. Only one procedure was converted because of a sliding Hem-o-lok clip on renal vein. Bouty *et al* showed that the incidence (3.8%) of local recurrence after laparoscopic total renal nephrectomy for Wilms tumor is not higher than the one described after open surgery (7.9%) ²⁰. The same team discussed the SIOP Umbrella criteria and compared 20 cases of Wilms tumor treated with laparoscopy (with 9 cases not respecting the criteria) and 34 treated with open technique ²¹. They showed that, in experienced hands, Wilms tumor extending to the midline and not only to the lateral border of the vertebra could be eligible for mini-invasive surgery. Similarly, out of the seven patients with neuroblastic tumors classified as L2, making mini-invasive surgery risky and difficult ²², only one ganglioneuroma was converted. Nevertheless, Irtan *et al* reported a series of 39 neuroectodermic tumors with IDRF in 19 cases treated with mini invasive surgery. The conclusion was not to recommend mini invasive surgery with preoperative IDRF in the absence of large multicentric studies, even if this rule depends on the location and the experience of the surgical team. For example tumors encasing the inferior mesenteric artery carry a better surgical prognosis compared to the ones encasing the superior mesenteric artery or coeliac axis ²³.

Concerning renal tumors, four cases of partial nephrectomy via retroperitoneal approach were reported with no peroperative complication and negative margins. We think that this approach permits to preserve the peritoneal cavity in case of future surgery.

Out of the 81 tumor resections, there were not any tumor upstaging due to the robotic surgery. There were seven conversions and in three cases because of vascular bleedings. Conversions should of course not be considered as a failure if permits to respect the oncological rules of tumor resection. One child died ten months after the robotic surgery from cerebral hemorrhage. There was one local recurrence (renal sarcoma) with a median follow-up of 19.8 months.

Conclusion

This robotic series is the largest known one in pediatric oncology. The oncological surgical principles were respected with no tumor upstaging because of this technique. It shows that robotic surgery for tumors in children is feasible and may be an option in highly selected cases after discussion in tumor boards. Indications still need to better defined.

References

1. Pritchard-Jones, K. *et al.* Omission of doxorubicin from the treatment of stage II-III, intermediate-risk Wilms' tumour (SIOP WT 2001): An open-label, non-inferiority, randomised controlled trial. *Lancet* **386**, 1156–1164 (2015).
2. Phelps, H. & Lovvorn, III, H. Minimally Invasive Surgery in Pediatric Surgical Oncology. *Children* **5**, 158 (2018).
3. Christison-Lagay, E. R. & Thomas, D. Minimally Invasive Approaches to Pediatric Solid Tumors. *Surg. Oncol. Clin. N. Am.* **28**, 129–146 (2019).
4. Fuchs, J. The role of minimally invasive surgery in pediatric solid tumors. *Pediatr. Surg. Int.* **31**, 213–228 (2015).
5. Liebert, M. A. IPEG guidelines for the surgical treatment of adrenal masses in children. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* **20**, 14–16 (2010).
6. Meehan, J. J. M. D. F. Robotic Surgery for Pediatric Tumors. *Cancer J. March/April* **19**, 183–188 (2013).
7. Cundy, T. P. *et al.* Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery for Pediatric Solid Tumors: A Systematic Review of Feasibility and Current Status. *Eur. J. Pediatr. Surg.* (2013). doi:10.1055/s-0033-1347297
8. van Dalen, E. C. *et al.* Minimally invasive surgery versus open surgery for the treatment of solid abdominal and thoracic neoplasms in children. *Cochrane Database Syst. Rev.* (2015).
9. Hazinski, M. F. *et al.* Part 1: Executive summary: 2010 International Consensus on Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care Science with Treatment Recommendations. *Circulation* **122**, 250–275 (2010).
10. Blanc, T. *et al.* Robotic-assisted laparoscopic management of renal tumors in children: Preliminary results. *Pediatr. Blood Cancer* e27867 (2019).
11. Meehan, J. J. & Sandler, A. D. Robotic resection of mediastinal masses in children. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech. A* **18**, 114–119 (2008).
12. Meehan, J. J. & Sandler, A. Pediatric robotic surgery: A single-institutional review of the first 100 consecutive cases. *Surg. Endosc. Other Interv. Tech.* **22**, 177–182 (2008).
13. Meignan, P. *et al.* Robotic-assisted laparoscopic surgery for pediatric tumors: a bicenter experience. *J. Robot. Surg.* **12**, 501–508 (2018).
14. Guys, J. M., Delarue, A. & Gentet, P. Videosurgery in oncological pediatrics. *Pediatr. Surg. Int.* **10**, 371–373 (1995).
15. Meehan, J. J. Robotic Surgery in Small Children: Is There Room for This? *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* **19**, 707–712 (2009).
16. Wei, S., Chen, M., Chen, N. & Liu, L. Feasibility and safety of robot-assisted thoracic surgery for lung lobectomy in patients with non-small cell lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *World J. Surg. Oncol.* **15** (98), (2017).
17. Fok, M. *et al.* Video-Assisted Thoracoscopic Versus Robotic-Assisted Thoracoscopic Thymectomy. *Innovations* **12**, 259–264 (2017).
18. Bethea, B. T., Okamura, A. M., Kitagawa, M. & Yuh, D. D. Application of Haptic Feedback to Robotic Surgery. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* **14**, 191–195 (2005).
19. Varlet, F. *et al.* Laparoscopic radical nephrectomy for unilateral renal cancer in children. *Surg. Laparosc. Endosc. Percutan. Tech.* **19**, 148–52 (2009).

20. Bouty, A. *et al.* What is the risk of local recurrence after laparoscopic transperitoneal radical nephrectomy in children with Wilms tumours? Analysis of a local series and review of the literature. *J. Pediatr. Urol.* (2018). doi:10.1016/j.jpurol.2018.03.016
21. Burnand, K. *et al.* Laparoscopic nephrectomy for Wilms' tumor: Can we expand on the current SIOP criteria? *J. Pediatr. Urol.* **14**, 253.e1-253.e8 (2018).
22. Brisse, H. *et al.* Guidelines for Imaging and Staging of Neuroblastic Tumors: Consensus. *Radiology* **261**, 243–257 (2011).
23. Irtan, S. *et al.* Minimally Invasive Surgery of Neuroblastic Tumors in Children: Indications Depend on Anatomical Location and Image-Defined Risk Factors. *Pediatr. Blood Cancer* **62**, 257–261 (2015).

Figures / Tables

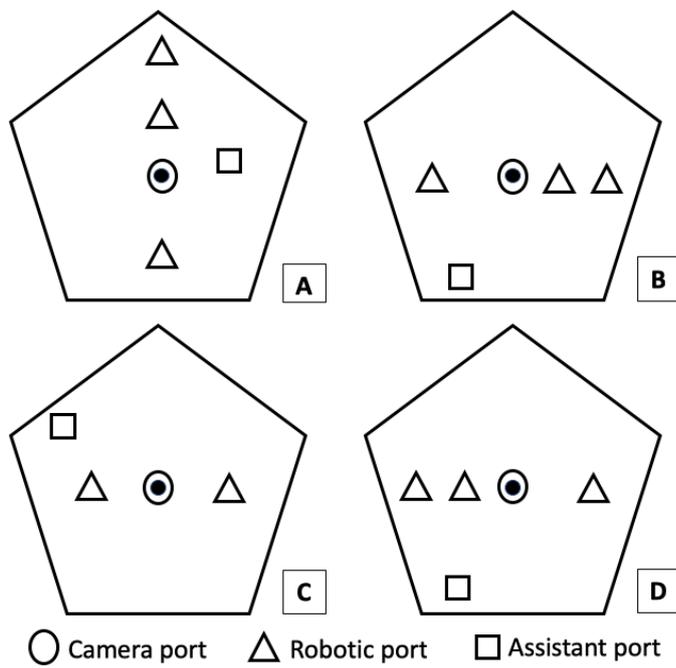


Figure 1. Trocar positions for different interventions.

- A. Right total nephrectomy / adrenalectomy.
- B. Bilateral adrenalectomy
- C. Pancreatectomy
- D. Pelvic tumor resection

Procedure	Histology	Cause
Right adrenalectomy	Pheochromocytoma	Adrenal vein injury
Right nephrectomy	Wilms	Renal vein injury
Right nephrectomy	Wilms	Misdiagnosed renal vein tumor thrombus
Left nephrectomy	Sarcoma	Difficult renal hilum dissection
Thoracic tumors resection	Neuroblastoma	Difficult dissection
Left nephrectomy	Wilms	Sliding Hem-o-lok clip on renal vein (emergency undocking)
Retroperitoneal tumor resection	Ganglioneuroma	Difficult dissection

Table 1. Conversions

Procedure	Histology	Complication	Time	Clavien Dindo	Management
En bloc nephrectomy, caudal pancreatectomy, splenectomy, partial diaphragmatic resection	Wilms	Diaphragmatic hernia	1 year	Grade IIIb	Robotic diaphragmatic defect suture
Neuroblastic thoracic tumor resection	Ganglioneuroma	Pneumothorax	H 1	Grade IIIb	Chest tube under GA
Lobectomy	Bronchial carcinoid tumor	Pneumothorax	D 28	Grade IIIb	Chest tube under GA
Total gastrectomy	Inflammatory myofibroblastic tumor	Anastomotic stenosis	D 8	Grade IIIb	Endoscopic balloon dilatation
		Adhesions	D 40	Grade IIIb	Laparotomy
Bilateral adrenalectomy	Carney Complex	Retroperitoneal collection	D 10	Grade IIIb	Percutaneous drainage

Table 2. Complications

Tumors (location or embryological origins)	Pathology	#	Stage	Prognosis factors	Resection margins	ETV (cm ³)	ETV/ EPBV	Local recurrence
Neuroblastic tumors (n=24)	Neuroblastoma – stroma poor	N=16	L1 n=6 L1M n=3 L1MS n=3 L2 n=1 L2M n=2 L2MS n=1	NMYC + (n=1)	R0 (n=13) R1 (n=3)	13.7 (6.6-34.5)	0.93 (0.23-2.2)	0
	Ganglioneuroblastoma – intermixed	N=3	L1 n=3		R0 (n=2) R1 (n=1)	44.3 (35.9-77.6)	3.3 (2.0-4.2)	0
	Ganglioneuroma	N=5	L1 n=2 L2 n=3		R0 (n=5)	186.5 (56.5 – 226.8)	5.94 (1.20 – 19.7)	0
Renal tumors (n=20)	Wilms tumor	N=17	Stage 1 (n=10) Stage 2 (n=4) Stage 3 (n=3)	Intermediate risk (n=12) High risk (n=5)	R0 (n=17)	24.5 (4.49 – 83.8)	1.72 (0.17 – 5.79)	0
	Tubulopapillary carcinoma	N=1	Stage 1	Sub type II Fuhrman III	R0 (n=1)	11.0	0.30	0
	Undifferentiated sarcoma	N=1	Stage 2		R0 (n=1)	99.8	2.61	1
	Metanephric adenoma	N=1			R0 (n=1)	4.12	0.12	0
Neuroendocrine tumors (n=11)	Pheochromocytoma	N=7			R0 (n=7)	20.4 (11.8-20.6)	1.17 (0.48 – 1.25)	0
	Paraganglioma	N=4			R0 (n=4)	5.02 (0.78-40.9)	0.21 (0.017 – 1.27)	0
Adrenal tumors (n=7)	McCune Albright (bilateral)	N=2			R0 (n=2)	13.0	3.1	0
	Carney Complex (bilateral)	N=2			R0 (n=2)	11.4	0.76	0
	Adrenocortical adenoma	N=2			R0 (n=2)	7.83	0.71	0
	Cystic lymphangioma	N=1			R0 (n=1)	18.9	0.41	0
Pancreatic tumors (n=3)	Focal congenital hyperinsulinism	N=2			R0 (n=1) R1 (n=1)	5.24	0.84	0
	MEN 1	N=1		G1	R0 (n=1)	16.5	0.50	0
Germ cell tumor (n=3)	Mature teratoma Immature teratoma	N=2 N=1			R0 (n=3)	50.3	1.29	0
Thymus (n=3)	MEN 1	N=1			R0 (n=1)	42.2	1.41	0
	Thymoma	N=2		Type B1	R0 (n=1) R1 (n=1)	11.6	0.32	0
Inflammatory myofibroblastic tumor (n=3)		N=3		ALK negative (n=1) ALK positive (n=2)	R0 (n=1) R1 (n=2)	73.9	2.59	0 0
Neurofibroma NF1 (n=1)	-	N=1			R0 (n=1)	100.5	3.27	0
Bronchial carcinoid tumor (n=1)		N=1			R0 (n=1)	8.4	0.23	0
Leiomyosarcoma (n=1)		N=1			R0 (n=1)	40	2.1	0
Lombo-aortic lymphadenectomy (n=1)		N=1			R0 (n=1)	2.10	0.056	0

Table 3. Tumor characteristics

ETV (Ellipsoid Tumor Volume) EPBV (Estimated Patient Blood Volume)

Initial procedure	Histology	Indication	Time	Management
Left nephrectomy (converted)	Sarcoma	Local recurrence	M10	Laparotomy
Middle pancreatectomy	Focal congenital hyperinsulinism	Incomplete resection	J7	Laparotomy
Subtotal thymectomy	Thymoma	Type 2B cells	M4	Totalisation of thymectomy

Table 4. Redo surgeries

Chapitre 5 : Innovations et perspectives

Avec l'évolution de la chirurgie mini-invasive, de nouvelles technologies s'implantent au bloc opératoire. L'avenir de la chirurgie repose sur une collaboration étroite avec les ingénieurs afin de mettre au point des techniques chirurgicales plus précises, plus sûres et plus performantes. Les caractéristiques technologiques du robot chirurgical da Vinci permettent d'envisager de tels progrès. D'autres nouveaux systèmes robotiques sont en plein développement et pourront également y contribuer.

I. Chirurgie guidée par l'image

L'objectif de la chirurgie mini-invasive est de limiter la dissection à l'organe cible, pour éviter de léser d'autres structures anatomiques, avec un risque de séquelles post opératoires. En chirurgie oncologique, la crainte d'une rupture tumorale, et donc de dissémination, nécessite une dissection très délicate et une mobilisation tumorale minimale.

La chirurgie guidée par l'image, ou réalité augmentée, est une perspective passionnante. Certaines spécialités ont été pionnières, telles que la neurochirurgie ¹¹⁹, la chirurgie endovasculaire ¹²⁰ ou l'ORL ¹²¹. Le travail sur des structures anatomiques contrastées et immobiles permet des reconstructions 3D plus aisées. Ces spécialités ont aujourd'hui recours en pratique clinique à la visualisation 3D pour aider à la réalisation du geste chirurgical. La difficulté à modéliser en 3D des structures anatomiques mobiles, hétérogènes et déformables rend cette pratique plus complexe en chirurgie générale. L'équipe du Professeur Luc Soler à l'IHU IRCAD (Strasbourg) a développé un service en ligne : Visible patients, qui permet d'obtenir le modèle 3D d'un patient à partir d'une imagerie pré opératoire (scanner) ¹²². L'équipe IMAG2 dirigée par le Professeur Sarnacki et le Professeur Bloch de l'IHU Imagine

(Paris) a débuté en 2015 un programme de recherche sur la reconstruction 3D à partir d'IRM pré-opératoire, en ciblant les tumeurs et malformations pelviennes de l'enfant.

A. Pré opératoire : reconstruction 3D

La première étape de la chirurgie guidée par l'image est la reconstruction d'un modèle en trois dimensions à partir de l'anatomie du patient. Ce modèle est créé à partir de différents types d'imagerie : scanner, IRM, échographie. Les acquisitions tomographiques peuvent être utilisées par des logiciels réalisant des reconstructions 3D de façon quasi automatique pour les organes immobiles à fort contraste avec de bons résultats ¹²³. En chirurgie pédiatrique oncologique, ces méthodes ne sont pas applicables pour tous les organes, notamment pour le pelvis, carrefour anatomique complexe des filières urinaire, génitale et digestive. L'équipe IMAG2 a fait le choix d'utiliser l'IRM, non irradiant par rapport au scanner, pour modéliser le pelvis des enfants en trois dimensions ¹²⁴.

Cette approche est une aide précieuse pour définir la meilleure stratégie pré-opératoire et faciliter le repérage peropératoire. Plusieurs options sont possibles : l'impression en 3D du modèle ou la visualisation à l'aide d'un logiciel interactif.

B. Per opératoire : overlay

La reconstruction en 3D du patient en transparence, recalée en direct et de façon automatique lors d'une chirurgie, est le rêve de nombreux chirurgiens. Un guidage peropératoire est déjà utilisé dans différentes spécialités.

L'équipe du Pr Luc Soler a utilisé des reconstructions 3D de foie (anatomie vasculaire et biliaire – image 20), recalées manuellement pour aider lors d'hépatectomies difficiles ¹²².

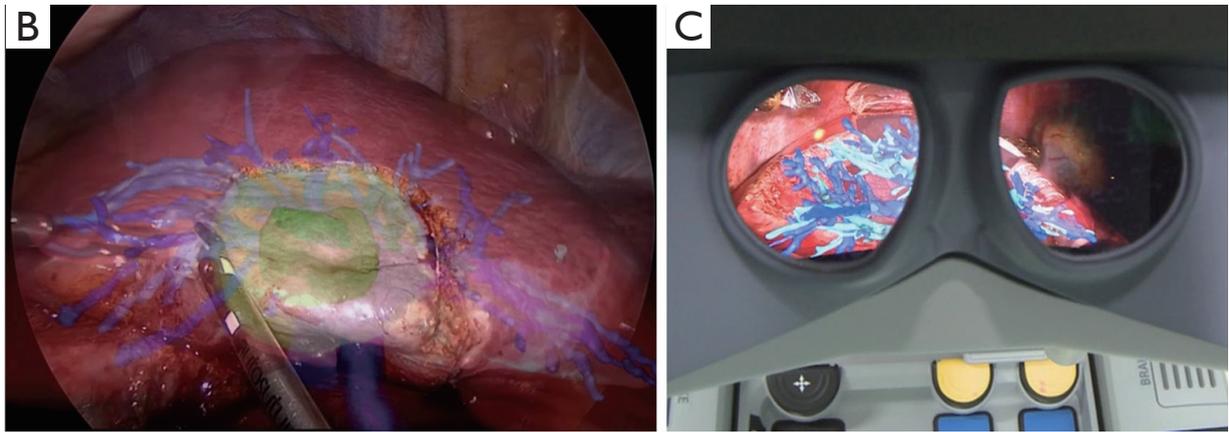


Image 20 : Vue per-opératoire virtuelle lors d'une chirurgie hépatique dans la console du robot Da Vinci avec le programme Visible patients.

L'équipe IMAG 2 travaille actuellement sur l'utilisation de la reconstruction 3D au bloc opératoire. Plusieurs interventions pour des tumeurs ont bénéficié de l'utilisation de la reconstruction 3D du patient en peropératoire. Ainsi, l'exérèse d'un neuroblastome pelvien par chirurgie robot-assistée a été réalisée avec intégration du modèle 3D dans la console du robot (image 21).

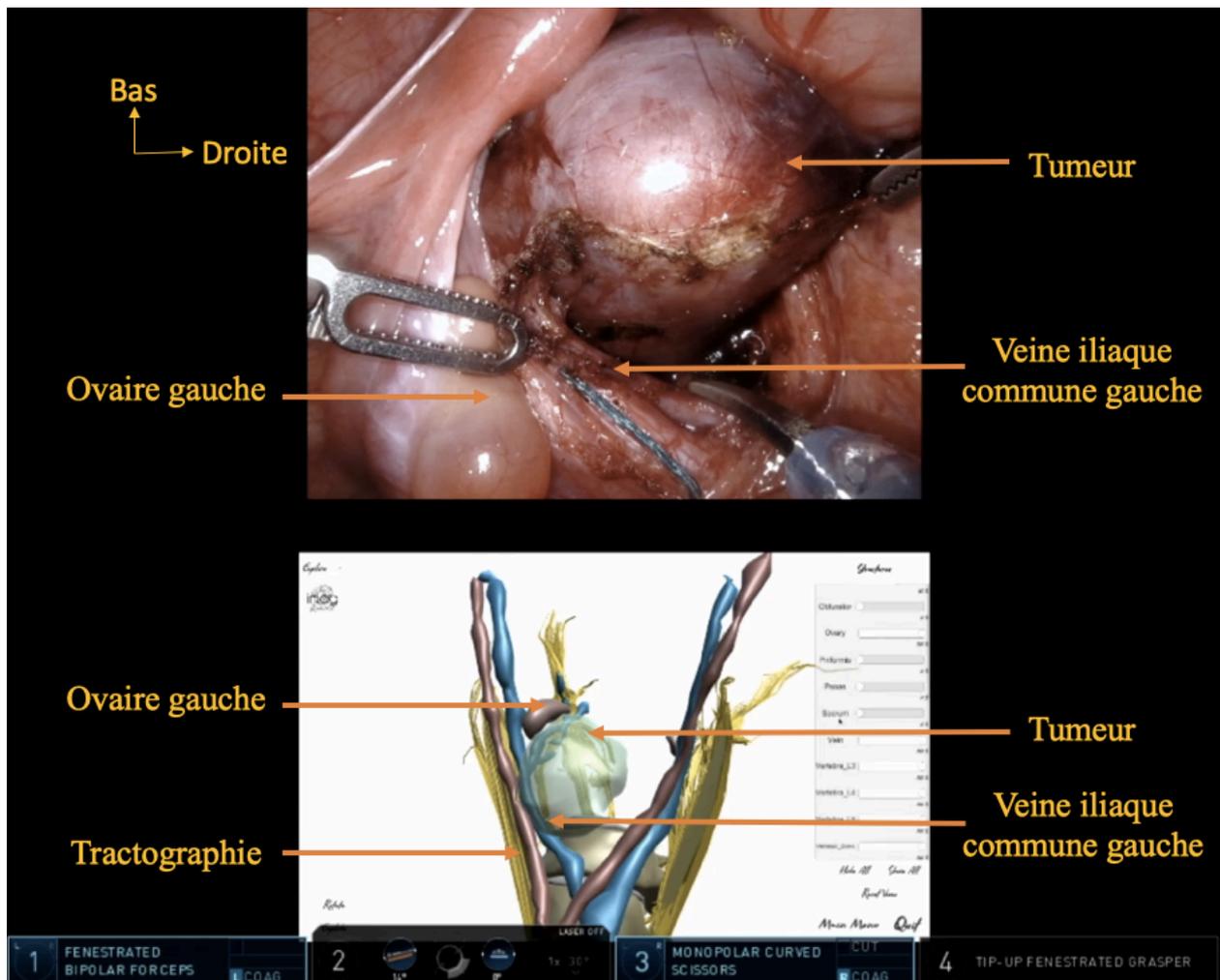


Image 21 : Vue per-opératoire dans la console du robot lors d'une intervention pour résection d'un neuroblastome pelvien. En haut : vue laparoscopique. En bas : modèle 3D interactif avec la tractographie (réseau nerveux pelvien - jaune), le système veineux (bleu), le système artériel (rouge), le neuroblastome (vert transparent).

Ces recherches sont les premiers pas vers une chirurgie assistée par la technologie. Les recherches futures vont se porter sur la façon de recalculer automatiquement le modèle 3D en tenant compte plus seulement de la forme, de la localisation et du volume des organes, mais également de la déformabilité, des propriétés mécaniques et des mouvements des organes, notamment respiratoires. La chirurgie robotique est adaptée à ce virage technologique avec la possibilité d'intégrer le modèle 3D dans la vision de la console.

Une des applications pourrait être le repérage plus rapide d'une tumeur rénale intra parenchymateuse lors d'une néphrectomie partielle. Malgré la réalisation d'une imagerie pré opératoire, il est parfois difficile de retrouver la tumeur en per opératoire ou de déterminer les

limites de résection pour obtenir des marges négatives, mais également préserver le plus possible de parenchyme rénal sain (préservation du capital néphronique). L'utilisation d'un masque 3D permettrait de réduire la durée de clampage vasculaire.

II. Élargissement des indications de chirurgie mini-invasive

Les possibilités de la chirurgie robotique couplée à la chirurgie guidée par l'image vont permettre d'élargir les indications de chirurgie mini-invasive en oncologie pédiatrique.

L'exemple du néphroblastome est intéressant avec le développement de la chirurgie mini-invasive, associée à une chirurgie d'épargne néphronique. En 2009, l'équipe du Pr Varlet a montré la faisabilité de la voie laparoscopique tout en respectant les principes de chirurgie oncologique, afin d'obtenir les mêmes résultats que par voie ouverte, après avoir soigneusement sélectionné les enfants. Les critères de non contre-indications à la laparoscopie étaient des limites tumorales post chimiothérapie ne dépassant pas la ligne médiane et l'absence de thrombus dans la veine rénale et dans la veine cave ⁵. La SIOP (International Society of Paediatric Oncology) a publié en 2014 le protocole Umbrella qui définissait les tumeurs opérables par voie mini-invasive. Ce sont des petites tumeurs centrales entourées de parenchyme rénal sain sans atteinte des structures extra rénales, avec une limite latérale ne croisant pas le bord homolatéral de la vertèbre adjacente et l'absence de thrombus rénal et cave ¹²⁵. Dans notre série, 7 néphroblastomes sur 12, pour lesquels était prévue une néphrectomie totale robot-assistée, dépassaient le bord homolatéral de la vertèbre. Une seule procédure sur ces 7 a abouti à une conversion avec dédocking en urgence suite au glissement d'un clip sur la veine rénale.

Concernant les 7 tumeurs neuroectodermiques classées L2 de notre série, une seule chirurgie (ganglioneurome rétropéritonéal) a été convertie pour cause de dissection difficile.

III. Apprentissage

L'apprentissage d'une nouvelle technique chirurgicale, la courbe d'apprentissage, représente le temps de formation nécessaire avant la maîtrise de la technique. L'évaluation de cette courbe d'apprentissage en robotique est difficile car les critères d'évaluation sont très hétérogènes selon les études ¹²⁶. Pourtant elle doit être évaluée afin d'orienter la pratique et permettre une amélioration de la performance globale. Les jeunes chirurgiens souhaitant débiter une activité de chirurgie robotique doivent pouvoir se baser sur la performance de chirurgiens plus experts. Un atout de la dernière version du robot da Vinci Xi est la présence d'une deuxième console qui permet de réaliser une intervention chirurgicale à deux opérateurs. L'intérêt est de pouvoir apprendre à un chirurgien à utiliser le robot progressivement sur différents temps opératoires et d'être en mesure de reprendre la main rapidement.

La dernière version du robot da Vinci Xi présente également un simulateur qui propose des exercices plus ou moins complexes pour progresser ; ce qui est une ressource pour accélérer la learning curve.

La première session d'un Masterclass de trois jours de chirurgie robotique pédiatrique a eu lieu du 16 au 18 octobre 2019 à Paris. Destiné aux chirurgiens débutants ou plus confirmés en robotique et dirigé par Dr Thomas Blanc, Pr Laurent Fourcade, Pr Hubert Lardy et Pr Sabine Sarnacki, cette première édition comprenait des enseignements théoriques et pratiques sur simulateur et cadavres perfusés ventilés.

IV. Nouvelle génération de robots chirurgicaux

D'autres systèmes robotiques ont vu le jour ces dernières années.

En 2014 CMR Surgical crée le robot chirurgical Versius (image 21). Le système est constitué de 3 à 5 bras indépendants placés comme le chirurgien le souhaite autour de la table

opérateur dont les avantages sont la portabilité et la petite taille. Une console à distance permet le contrôle des bras.

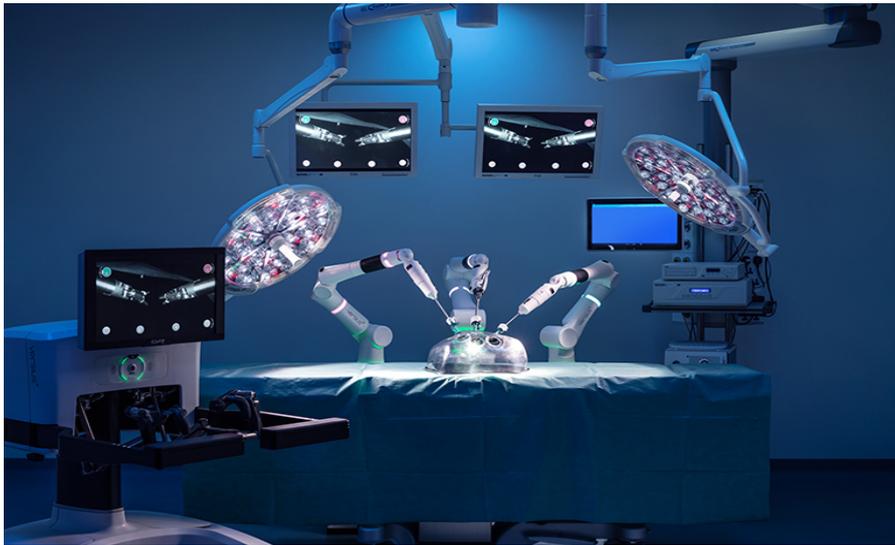


Image 21 : Robot Versius.

<https://www.medgadget.com/2018/09/versius-robotic-surgical-system-unveiled-by-uk-company.html>

En 2017 l'entreprise TransEnterix obtient la marque CE pour sa plateforme de robotique Senhance (image 22). L'atout de ce robot est de permettre aux chirurgiens de sentir le retour de force lors du maniement des instruments. Le contrôle n'est plus seulement visuel.

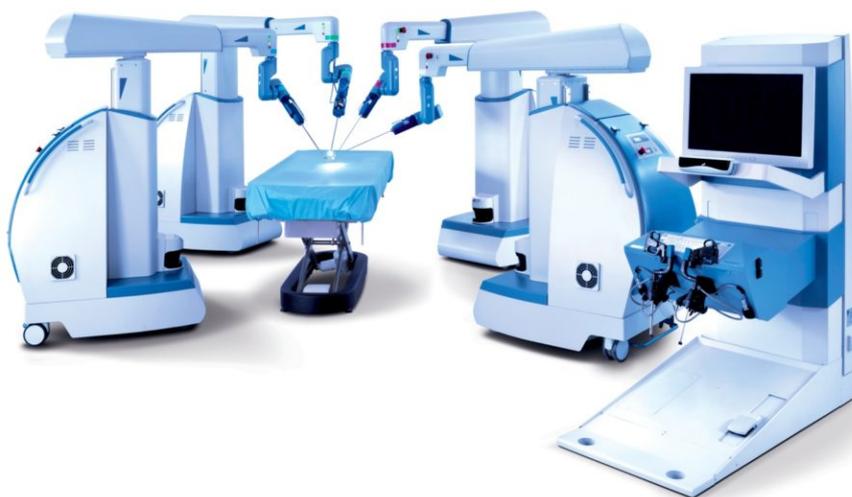


Image 22 : Robot Senhance.

<https://www.massdevice.com/11-surgical-robotics-companies-you-need-to-know/7/>

En 2019 Medtronic annonce la sortie de son robot chirurgical Hugo (image 23). Les caractéristiques des bras rejoignent celles du robot Versius avec une mobilité et une flexibilité importantes. Un des avantages intéressants du système sur le plan économique est la possibilité d'utiliser le système de visualisation, la caméra et le générateur en mode laparoscopique simple également.



Image 23 : Robot Hugo.

<https://4euxkl47p0vx1fmm22vvi3p-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/09/Medtronic-RAS-system-copy.jpg>

L'entreprise Titan Medical a créé le système SPORT (image 24). Ce robot chirurgical permet un abord mono-trocart avec un seul bras mobile et la possibilité d'utiliser deux instruments robotisés articulés avec la caméra.



Image 24 : Robot SPORT

<https://titanmedicalinc.com/wp-content/uploads/2016/05/Instrument-and-Camera-Pictures-150x150.jpg>

Conclusion

Le développement de la chirurgie robotique chez l'enfant s'inscrit dans la continuité de celui de la chirurgie mini-invasive dont les nombreux atouts sont largement démontrés.

L'oncologie pédiatrique est une spécialité particulière en raison du risque de rupture et de dissémination tumorale, qui peut compromettre le pronostic de l'enfant.

Notre étude sur une série multicentrique (Tours, Limoges et Necker – Enfants Malades) de tumeurs chez l'enfant opérées en chirurgie robotique montre l'hétérogénéité des tumeurs, que ce soit en termes d'âge, de localisation (thorax, abdomen, pelvis) et d'histologie. La sélection rigoureuse des patients au sein d'équipes ayant la double expertise de l'oncologie pédiatrique et de la robotique est un élément essentiel dans le succès de la prise en charge de ces enfants.

Nos premiers résultats sont concluants, notamment en termes de morbidités per et post opératoires, sans rupture tumorale ou récurrence. Un suivi régulier en collaboration avec les oncologues permettra de faire progresser notre réflexion.

Notre objectif est d'élargir les indications de la chirurgie robotique en oncologie pédiatrique et de former de jeunes chirurgiens, tout en maintenant une exigence de sécurité pour les enfants.

Les innovations en termes de chirurgie guidée par l'image s'intègrent parfaitement dans notre démarche de chirurgie de précision qui s'appuie sur les atouts de la chirurgie robotique.

Bibliographie

1. Jones, V. S. & Cohen, R. C. Two decades of minimally invasive pediatric surgery-taking stock. *J. Pediatr. Surg.* **43**, 1653–1659 (2008).
2. Schukfeh, N., Kuebler, J., Dingemann, J. & Ure, B. Thirty Years of Minimally Invasive Surgery in Children: Analysis of Meta-Analyses. *Eur. J. Pediatr. Surg.* (2019).
3. Rahman, A. *et al.* European Paediatric Surgeons' Association Survey on the Management of Pediatric Appendicitis. *Eur. J. Pediatr. Surg.* **29**, 053–061 (2018).
4. Mirallié, E. *et al.* Laparoscopic adrenalectomy in children. *Surg. Endosc.* **15**, 156–160 (2001).
5. Varlet, F. *et al.* Laparoscopic radical nephrectomy for unilateral renal cancer in children. *Surg. Laparosc. Endosc. Percutan. Tech.* **19**, 148–52 (2009).
6. Duarte, R. J., Dénes, F. T., Cristofani, L. M., Odone-Filho, V. & Srougi, M. Further experience with laparoscopic nephrectomy for Wilms' tumour after chemotherapy. *BJU Int.* **98**, 155–159 (2006).
7. Metzelder, M. L. *et al.* Role of diagnostic and ablative minimally invasive surgery for pediatric malignancies. *Cancer* **109**, 2343–2348 (2007).
8. Warmann, S., Fuchs, J., Jesch, N. K., Schrappe, M. & Ure, B. M. A prospective study of minimally invasive techniques in pediatric surgical oncology: preliminary report. *Med. Pediatr. Oncol.* **40**, 155–157 (2003).
9. Blanc, T. *et al.* Robotic-assisted laparoscopic management of renal tumors in children: Preliminary results. *Pediatr. Blood Cancer* e27867 (2019).
10. Phelps, H. & Lovvorn, III, H. Minimally Invasive Surgery in Pediatric Surgical Oncology. *Children* **5**, 158 (2018).
11. Gresky, J. *et al.* New cases of trepanations from the 5th to 3rd millennia BC in Southern Russia in the context of previous research: Possible evidence for a ritually motivated tradition of cranial surgery? *Am. J. Phys. Anthropol.* **160**, 665–682 (2016).
12. Lau, W. Y., Leow, C. K. & Li, A. K. C. History of Endoscopic and Laparoscopic Surgery. *World J. Surg.* **21**, 444–453 (1997).
13. Spaner, S. J. & Warnock, G. L. A Brief History of Endoscopy, Laparoscopy, and Laparoscopic Surgery. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* **7**, 369–373 (1997).
14. Ramai, D., Zakhia, K., Etienne, D. & Reddy, M. Philipp Bozzini (1773–1809): The earliest description of endoscopy. *J. Med. Biogr.* **0**, 1–5 (2018).
15. Matteson, E. L. History of vasculitis: The life and work of Adolf Kussmaul. *Cleve. Clin. J. Med.* **79**, 54–56 (2012).
16. Herr, H. W. Max Nitze, the Cystoscope and Urology. *J. Urol.* **176**, 1313–1316 (2006).
17. Schollmeyer, T., Soyinka, A. S., Schollmeyer, M. & Meinhold-Heerlein, I. Georg Kelling (1866-1945): The root of modern day minimal invasive surgery. A forgotten legend? *Arch. Gynecol. Obstet.* **276**, 505–509 (2007).
18. Hatzinger, M., Kwon, S. T., Langbein, S. & Kamp, S. Hans Christian Jacobaeus: Inventor of Human Laparoscopy and Thoracoscopy. *J. Endourol.* **20**, 848–850 (2006).
19. Himal, H. S. Minimally invasive (laparoscopic) surgery. *Surg. Endosc.* **16**, 1647–1652 (2002).
20. Litynski, G. S. Laparoscopy between the world wars: the barriers to trans-atlantic exchange. Spotlighting Heinz Kalk and John C. Ruddock. *JSLs* **1**, 185–188 (1997).
21. Vilos, G., Ternamian, A., Dempster, J. & Laberge, P. Laparoscopic Entry : A Review of Techniques , Technologies , and Complications. *J. Obstet. Gynaecol. Canada* **29**, 433–447 (2007).
22. Semm, K. Endoscopic Appendectomy. *Endoscopy* **15**, 59–64 (1983).
23. Mouret, P. How I developed laparoscopic cholecystectomy. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore* **25**, 744–747 (1996).
24. Kalan, S. *et al.* History of robotic surgery. *J. Robot. Surg.* **4**, 141–147 (2010).

25. Kwoh, Y. S., Hou, J., Jonckheere, E. & Hayati, S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery - Biomedical Engineering, *IEEE Transactions on. IEEE Trans. Biomed. Eng.* **35**, (1988).
26. Yasin, H., Hoff, H. J., Blümcke, I. & Simon, M. Experience with 102 Frameless Stereotactic Biopsies Using the neuromate Robotic Device. *World Neurosurg.* 1–7 (2018). doi:10.1016/j.wneu.2018.11.187
27. Bargar, W. L. *et al.* Fourteen Year Follow-Up of Randomized Clinical Trials of Active Robotic-Assisted Total Hip Arthroplasty. *J. Arthroplasty* **33**, 810–814 (2018).
28. Harris, S. J., Arambula-Cosio, F. & Mei, Q. The Probot-an active robot for prostate resection. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.* **211**, 317–325 (1997).
29. Maurin, B. *et al.* A patient-mounted robotic platform for CT-scan guided procedures. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **55**, 2417–2425 (2008).
30. Krupa, A., Fichtinger, G. & Hager, G. D. Real-time tissue tracking with B-mode ultrasound using speckle and visual servoing. *Med. Image Comput. Comput. Assist. Interv.* **10**, 1–8 (2007).
31. Moreau-Gaudry, A. *et al.* Prostate biopsies assisted by comanipulated probe-holder: first in man. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* **11**, 1153–1161 (2016).
32. Riga, C. V., Bicknell, C. D., Rolls, A., Cheshire, N. J. & Hamady, M. S. Robot-assisted fenestrated endovascular aneurysm repair (FEVAR) using the magellan system. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **24**, 191–196 (2013).
33. Kraft, B. M., Jäger, C., Kraft, K., Leibl, B. J. & Bittner, R. The AESOP robot system in laparoscopic surgery: Increased risk or advantage for surgeon and patient? *Surg. Endosc. Other Interv. Tech.* **18**, 1216–1223 (2004).
34. Pugin, F., Bucher, P. & Morel, P. History of robotic surgery : From AESOP® and ZEUS® to da Vinci®. *J. Visc. Surg.* **148**, e3–e8 (2011).
35. Marescaux, J. & Rubino, F. The ZEUS robotic system: Experimental and clinical applications. *Surg. Clin. North Am.* **83**, 1305–1315 (2003).
36. Varlet, F., Tardieu, D., Limonne, B., Metafiot, H. & Chavrier, Y. Laparoscopic versus open appendectomy in children--comparative study of 403 cases. *Eur. J. Pediatr. Surg.* **4**, 333–337 (1994).
37. Cadière, G. B. *et al.* Feasibility of robotic laparoscopic surgery: 146 cases. *World J. Surg.* **25**, 1467–1477 (2001).
38. Tantoco, J., Glick, P. L. & Hollands, C. M. The Integration of Robotic Technology in Pediatric Surgery. *Pediatr. Endosurgery Innov. Tech.* **7**, 355–361 (2003).
39. Dubois, F., Berthelot, G. & Levard, H. Cholecystectomy by coelioscopy. *Press. medicale* **18**, 980–982 (1989).
40. Marescaux, J. *et al.* Telerobotic laparoscopic cholecystectomy: Initial clinical experience with 25 patients. *Ann. Surg.* **234**, 1–7 (2001).
41. Meehan, J. J. & Sandler, A. Pediatric robotic surgery: A single-institutional review of the first 100 consecutive cases. *Surg. Endosc. Other Interv. Tech.* **22**, 177–182 (2008).
42. Dallemagne, B., Weerts, J. M., Jehaes, C., Markiewicz, S. & Lombard, R. Laparoscopic Nissen fundoplication: preliminary report. *Surg. Laparosc. Endosc.* **1**, 138–143 (1991).
43. Meininger, D., Byhahn, C., Markus, B. H., Heller, K. & Westphal, K. [Total endoscopic Nissen fundoplication with the robotic device ‘da Vinci’ in children. Hemodynamics, gas exchange, and anesthetic management]. *Anaesthesist* **50**, 271–275 (2001).
44. Clayman, R. V *et al.* Laparoscopic Nephrectomy: Initial Case Report. *J. Urol.* **197**, S182–S186 (2017).
45. Ehrlich, R. M., Gershman, A., Mee, S. & Fuchs, G. Laparoscopic Nephrectomy in a Child: Expanding Horizons for Laparoscopy in Pediatric Urology. *J. Endourol.* **6**, 463–465 (1992).
46. Gettman, M. T. *et al.* Robotic-assisted laparoscopic partial nephrectomy: Technique

- and initial clinical experience with daVinci robotic system. *Urology* **64**, 914–918 (2004).
47. Peters, C. A. Robotically assisted surgery in pediatric urology. *Urol. Clin. North Am.* **31**, 743–752 (2004).
 48. Jacobs, M., Verdeja, J. C. & Goldstein, H. S. Minimally invasive colon resection (laparoscopic colectomy). *Surg. Laparosc. Endosc.* **1**, 144–150 (1991).
 49. Wulkan, M. L. & Georgeson, K. E. Primary laparoscopic endorectal pull-through for Hirschsprung's disease in infants and children. *Surg. Innov.* **5**, 9–13 (1998).
 50. Weber, P. A., Merola, S., Wasielewski, A., Ballantyne, G. H. & Delaney, C. P. Telerobotic-assisted laparoscopic right and sigmoid colectomies for benign disease. *Dis. Colon Rectum* **45**, 1689–1696 (2002).
 51. Schuessler, W., Grune, M., Tecuanhuey, L. & Preminger, G. Laparoscopic dismembered pyeloplasty. *J. Urol.* **150**, 1795–1799 (1993).
 52. Peters, C. A., Schluskel, R. N. & Retik, A. B. Pediatric laparoscopic dismembered pyeloplasty. *J. Urol.* **153**, 1962–1965 (1995).
 53. Patel, V. Robotic-assisted laparoscopic dismembered pyeloplasty. *Urology* **66**, 45–49 (2005).
 54. Bax, N. M. A. Laparoscopic surgery in infants and children. *Eur. J. Pediatr. Surg.* **15**, 319–324 (2005).
 55. Cortesi, N. *et al.* Diagnosis of bilateral abdominal cryptorchidism by laparoscopy. *Endoscopy* **8**, 33–34 (1976).
 56. Andze, G. O., Homsy, Y., Laberge, I., Desjardins, J. G. & Kiruluta, H. G. [The role of therapeutic laparoscopy in the surgical treatment of intra-abdominal testes in children]. *Chir. Pediatr.* **31**, 299–302 (1990).
 57. Shehata, S. M. Laparoscopically assisted gradual controlled traction on the testicular vessels: a new concept in the management of abdominal testis. A preliminary report. *Eur. J. Pediatr. Surg.* **18**, 402–406 (2008).
 58. Valla, J. S. *et al.* Retroperitoneal laparoscopic nephrectomy in children. Preliminary report of 18 cases. *Eur. Urol.* **30**, 490–493 (1996).
 59. Yeung, C. K., Tam, Y. H., Sihoe, J. D., Lee, K. H. & Liu, K. . Retroperitoneoscopic dismembered pyeloplasty for pelvi-ureteric junction obstruction in infants and children. *BJU Int.* **87**, 509–513 (2001).
 60. Anderson, S. A., Beierle, E. A. & Chen, M. K. Role of laparoscopy in the prevention and in the treatment of adhesions. *Semin. Pediatr. Surg.* **23**, 353–356 (2014).
 61. Wang, M. K. *et al.* Scar acceptance after pediatric urologic surgery. *J. Pediatr. Urol.* **14**, 175.e1-175.e6 (2018).
 62. Barbosa, J. A. B. A. *et al.* Parent and patient perceptions of robotic vs open urological surgery scars in children. *J. Urol.* **190**, 244–250 (2013).
 63. Jaschinski, T., Mosch, C. G., Eikermann, M., Neugebauer, E. A. & Sauerland, S. Laparoscopic versus open surgery for suspected appendicitis. *Cochrane database Syst. Rev.* **11**, CD001546 (2018).
 64. Kauffman, J. D., Snyder, C. W., Danielson, P. D. & Chandler, N. M. 30-Day Outcomes of Laparoscopic Versus Open Total Proctocolectomy with Ileoanal Anastomosis in Children and Young Adults: A Combined Analysis of the National Surgical Quality Improvement Project Pediatric and Adult Databases. *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech. A* **29**, 402–408 (2019).
 65. Cave, J. & Clarke, S. Pediatric robotic surgery. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.* **100**, 18–21 (2018).
 66. Basto, M. *et al.* Patterns-of-care and health economic analysis of robot-assisted radical prostatectomy in the Australian public health system. *BJU Int.* **117**, 930–939 (2016).
 67. Cundy, T. P., Marcus, H. J., Hughes-Hallett, A., Khurana, S. & Darzi, A. Robotic surgery in children: adopt now, await, or dismiss? *Pediatr. Surg. Int.* **31**, 1119–1125 (2015).

68. Cundy, T. P., Harling, L., Marcus, H. J., Athanasiou, T. & Darzi, A. W. Meta analysis of robot-assisted versus conventional laparoscopic fundoplication in children. *J. Pediatr. Surg.* **49**, 646–652 (2014).
69. Cundy, T. P. *et al.* Meta-analysis of robot-assisted vs conventional laparoscopic and open pyeloplasty in children. *BJU Int.* **114**, 582–594 (2014).
70. Meehan, J. J., Elliott, S. & Sandler, A. The robotic approach to complex hepatobiliary anomalies in children: preliminary report. *J. Pediatr. Surg.* **42**, 2110–2114 (2007).
71. Barashi, N. S., Rodriguez, M. V., Packiam, V. T. & Gundeti, M. S. Bladder Reconstruction with Bowel: Robot-Assisted Laparoscopic Ileocystoplasty with Mitrofanoff Appendicovesicostomy in Pediatric Patients. *J. Endourol.* **32**, S119–S126 (2018).
72. Cundy, T. P. *et al.* The first decade of robotic surgery in children. *J. Pediatr. Surg.* **48**, 858–865 (2013).
73. Kasturi, S., Sehgal, S. S., Christman, M. S., Lambert, S. M. & Casale, P. Prospective long-term analysis of nerve-sparing extravesical robotic-assisted laparoscopic ureteral reimplantation. *Urology* **79**, 680–683 (2012).
74. Pritchard-Jones, K. *et al.* Cancer in children and adolescents in Europe: Developments over 20 years and future challenges. *Eur. J. Cancer* **42**, 2183–2190 (2006).
75. Kaatsch, P. Epidemiology of childhood cancer. *Cancer Treat. Rev.* **36**, 277–285 (2010).
76. Breslow, N., Olshan, A., Beckwith, J. B. & Green, D. M. Epidemiology of Wilms Tumor. **181**, 172–181 (1993).
77. Stiller, C. A. Epidemiology and genetics of childhood cancer. *Oncogene* **23**, 6429–6444 (2004).
78. Dumoucel, S. *et al.* Malformations, Genetic Abnormalities, and Wilms Tumor. *Pediatr. Blood Cancer* **61**, 140–144 (2014).
79. Harttrampf, A. C. *et al.* Molecular Screening for Cancer Treatment Optimization (MOSCATO-01) in Pediatric Patients : A Single-Institutional Prospective Molecular Stratification Trial. 6101–6113 (2017). doi:10.1158/1078-0432.CCR-17-0381
80. Plantaz, D. Le neuroblastome un siècle après Pepper : Quels sont les gènes ? *Arch. Pediatr.* **8**, 917–921 (2001).
81. O’Neill, A. F. Update in Pediatric Oncology: Section B - Solid Tumors of Childhood. *Updat. Pediatr.* **section B**, 485–511 (2018).
82. Brisse, H. *et al.* Guidelines for Imaging and Staging of Neuroblastic Tumors: Consensus. *Radiology* **261**, 243–257 (2011).
83. Irtan, S. *et al.* Minimally Invasive Surgery of Neuroblastic Tumors in Children: Indications Depend on Anatomical Location and Image-Defined Risk Factors. *Pediatr. Blood Cancer* **62**, 257–261 (2015).
84. Perlman, E. J. Pediatric renal tumors: Practical updates for the pathologist. *Pediatr. Dev. Pathol.* **8**, 320–338 (2005).
85. de Wit, R. & Fizazi, K. Controversies in the management of clinical stage I testis cancer. *J. Clin. Oncol.* **24**, 5482–5492 (2006).
86. Vanden Berg, R. N. W., Bierman, E. N., Van Noord, M., Rice, H. E. & Routh, J. C. Nephron-sparing surgery for Wilms tumor: A systematic review. *Urol. Oncol. Semin. Orig. Investig.* **34**, 24–32 (2016).
87. Bouty, A. *et al.* What is the risk of local recurrence after laparoscopic transperitoneal radical nephrectomy in children with Wilms tumours? Analysis of a local series and review of the literature. *J. Pediatr. Urol.* (2018). doi:10.1016/j.jpuro.2018.03.016
88. Burnand, K. *et al.* Laparoscopic nephrectomy for Wilms’ tumor: Can we expand on the current SIOP criteria? *J. Pediatr. Urol.* **14**, 253.e1-253.e8 (2018).
89. Meignan, P. *et al.* Robotic-assisted laparoscopic surgery for pediatric tumors: a bicenter experience. *J. Robot. Surg.* **12**, 501–508 (2018).
90. Adkins, E. S. *et al.* Efficacy of complete resection for high-risk neuroblastoma: A

- children's cancer group study. *J. Pediatr. Surg.* **39**, 931–936 (2004).
91. Zwaveling, S., Tytgat, G. A. M., Van Der Zee, D. C., Wijnen, M. H. W. A. & Heij, H. A. Is complete surgical resection of stage 4 neuroblastoma a prerequisite for optimal survival or may >95 % tumour resection suffice? *Pediatr. Surg. Int.* **28**, 953–959 (2012).
 92. Laprie, A. *et al.* Radiothérapie des cancers de l'enfant. *Cancer/Radiotherapie* **20**, S216–S226 (2016).
 93. Tobis, S. *et al.* Near Infrared Fluorescence Imaging With Robotic Assisted Laparoscopic Partial Nephrectomy : Initial Clinical Experience for Renal Cortical Tumors. *J. Urol.* **186**, 47–52 (2011).
 94. Sanchez-Margallo, F. & Sanchez-Margallo, J. Ergonomics in laparoscopic surgery. in *Laparoscopic surgery* 105–125 (2017).
 95. Lee, G. I. *et al.* Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries. *Surg. Endosc.* **28**, 456–465 (2014).
 96. Moore, L. J. *et al.* Surgeons' display reduced mental effort and workload while performing robotically assisted surgical tasks, when compared to conventional laparoscopy. *Surg. Endosc.* **29**, 2553–2560 (2015).
 97. Lux, M. M., Marshall, M., Erturk, E. & Joseph, J. V. Ergonomic Evaluation and Guidelines for Use of the daVinci Robot System. *J. Endourol.* **24**, 371–375 (2010).
 98. Marescaux, J. *et al.* Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature* **413**, 379–380 (2001).
 99. Marescaux, J. *et al.* Transcontinental Robot-Assisted Remote Telesurgery: Feasibility and Potential Applications. *Ann. Surg.* **235**, 487–492 (2002).
 100. Fok, M. *et al.* Video-Assisted Thoracoscopic Versus Robotic-Assisted Thoracoscopic Thymectomy. *Innovations* **12**, 259–264 (2017).
 101. Uyama, I. *et al.* Clinical advantages of robotic gastrectomy for clinical stage I/II gastric cancer: a multi-institutional prospective single-arm study. *Gastric Cancer* **22**, 377–385 (2019).
 102. Qiu, J., Chen, S. & Chengyou, D. A systematic review of robotic-assisted liver resection and meta-analysis of robotic versus laparoscopic hepatectomy for hepatic neoplasms. *Surg. Endosc.* **30**, 862–875 (2016).
 103. Ramirez, P. T. *et al.* Minimally Invasive versus Abdominal Radical Hysterectomy for Cervical Cancer. *N. Engl. J. Med.* **379**, 1895–1904 (2018).
 104. Thakre, A. A., Bailly, Y., Sun, L. W., Van Meer, F. & Yeung, C. K. Is Smaller Workspace a Limitation for Robot Performance in Laparoscopy? *J. Urol.* **179**, 1138–1143 (2008).
 105. Ballouhey, Q. *et al.* A comparison of robotic surgery in children weighing above and below 15.0 kg: size does not affect surgery success. *Surg. Endosc.* **29**, 2643–2650 (2015).
 106. Meehan, J. J. Robotic Surgery in Small Children: Is There Room for This? *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.* **19**, 707–712 (2009).
 107. Finkelstein, J. B. *et al.* How to decide which infant can have robotic surgery? Just do the math. *J. Pediatr. Urol.* **11**, 170.e1-170.e4 (2015).
 108. O'Sullivan, O. E., O'Sullivan, S., Hewitt, M. & O'Reilly, B. A. Da Vinci robot emergency undocking protocol. *J. Robot. Surg.* **10**, 251–253 (2016).
 109. Yuh, B. The Bedside Assistant in Robotic Surgery - Keys to Success. *Urol. Nurs.* **33**, 29 (2018).
 110. Stephenson, J., Gow, K. W., Meehan, J., Hawkins, D. S. & Avansino, J. Ewing Sarcoma/Primitive Neuroectodermal Tumor Arising From the Adrenal Gland in an Adolescent. *Pediatr. Blood Cancer* **57**, 691–692 (2011).
 111. Cundy, T. P. *et al.* Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery for Pediatric Solid Tumors: A Systematic Review of Feasibility and Current Status. *Eur. J. Pediatr. Surg.*

- (2013). doi:10.1055/s-0033-1347297
112. Meehan, J. J. M. D. F. Robotic Surgery for Pediatric Tumors. *Cancer J. March/April* **19**, 183–188 (2013).
 113. Iavazzo, C. & Gkegkes, I. D. Port site metastases after robot-assisted surgery : a systematic review. 423–427 (2013). doi:10.1002/rcs
 114. Ruurda, J. P., Visser, P. L. & Broeders, I. A. M. J. Analysis of procedure time in robot-assisted surgery: Comparative study in laparoscopic cholecystectomy. *Comput. Aided Surg.* **8**, 24–29 (2003).
 115. Ploussard, G. *et al.* Is Robot Assistance Affecting Operating Room Time Compared with Pure Retroperitoneal Laparoscopic Radical Prostatectomy? *J. Endourol.* **23**, 939–943 (2009).
 116. Moldes, J. M. *et al.* Pediatric Robotic Surgery in South America: Advantages and Difficulties in Program Implementation. *Front. Pediatr.* **7**, 1–5 (2019).
 117. Casarin, J. *et al.* Implementing robotic surgery for uterine cancer in the United States: Better outcomes without increased costs. *Gynecol. Oncol.* **156**, 451–458 (2020).
 118. Nabi, J. *et al.* Assessment of Out-of-Pocket Costs for Robotic Cancer Surgery in US Adults. *JAMA Netw. open* **3**, e1919185 (2020).
 119. Peters, T. *et al.* Three-dimensional multimodal image-guidance for neurosurgery. *IEEE Trans. Med. Imaging* **15**, 121–128 (1996).
 120. Tacher, V. *et al.* Image Guidance for Endovascular Repair of Complex Aortic Aneurysms: Comparison of Two-dimensional and Three-dimensional Angiography and Image Fusion. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **24**, 1698–1706 (2013).
 121. Gunkel, A. R., Freysinger, W. & Thumfart, W. F. Experience with various 3-dimensional navigation systems in head and neck surgery. *Arch. Otolaryngol. - Head Neck Surg.* **126**, 390–395 (2000).
 122. Soler, L., Nicolau, S., Pessaux, P., Mutter, D. & Marescaux, J. Real-time 3D image reconstruction guidance in liver resection surgery. *Hepatobiliary Surg. Nutr.* **3**, 73–81 (2014).
 123. Kim, Y. *et al.* Automatic segmentation and user-friendly software techniques for virtual surgical planning of mandibular reconstruction. *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS* 2512–2515 (2016).
 124. Müller, C. O. *et al.* Towards building 3D individual models from MRI segmentation and tractography to enhance pediatric surgery planning of pelvic tumors and malformations. in *Surgetica* 113–116 (2017).
 125. Van Den Heuvel-Eibrink, M. M. *et al.* Position Paper: Rationale for the treatment of Wilms tumour in the UMBRELLA SIOP-RTSG 2016 protocol. *Nat. Rev. Urol.* **14**, 743–752 (2017).
 126. Kassite, I., Bejan-Angoulvant, T., Lardy, H. & Binet, A. A systematic review of the learning curve in robotic surgery: range and heterogeneity. *Surg. Endosc.* **33**, 353–365 (2019).

Vu, le Directeur de Thèse

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a horizontal line extending to the left.

**Vu, le Doyen
De la Faculté de Médecine de Tours
Tours, le**

MEIGNAN Pierre

85 pages – 24 images – 5 figures – 4 tableaux

Résumé :

Les avantages de la chirurgie mini-invasive sont largement démontrés. La chirurgie robotique, qui s'inscrit comme une évolution de la chirurgie mini-invasive, est encore peu utilisée chez l'enfant, en particulier dans le domaine de la chirurgie oncologique.

L'objet de ce travail est d'analyser les résultats préliminaires d'une série multicentrique française de tumeurs chez l'enfant opéré en chirurgie robotique, en termes d'indications opératoires, de morbidité et de résultats à moyen terme.

La première partie retrace l'évolution de la chirurgie mini-invasive puis de la chirurgie robotique.

La seconde partie s'intéresse aux spécificités pédiatriques de la chirurgie mini-invasive.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de la pertinence de la chirurgie mini-invasive et plus spécifiquement de la chirurgie robotique en oncologie pédiatrique.

Les résultats d'une série multicentrique de 77 enfants opérés d'une tumeur par laparoscopie ou thoracoscopie robot-assistée entre 2008 et 2020 à Limoges, Necker – Enfants Malades (Paris) et Tours sont analysés en quatrième partie.

Le dernier chapitre présente les innovations et les perspectives du développement de la chirurgie robotique en oncologie pédiatrique. La chirurgie guidée par l'image, avec en particulier la reconstruction en trois dimensions de l'anatomie du patient et son utilisation au bloc opératoire, fera partie intégrante de la chirurgie oncologique pédiatrique dans les années futures.

Mots clés : robot – chirurgie pédiatrique – cancer – chirurgie mini-invasive

Jury :

Président du Jury : Professeur Hubert LARDY

Directeur de thèse : Docteur Thomas BLANC

Membres du Jury : Professeur Sabine SARNACKI
Professeur Laurent FOURCADE
Professeur Emmanuel GYAN
Docteur Aurélien BINET

Date de soutenance : 28 avril 2020