

Computer-Assisted Surgery in General Surgery in the Era of Artificial Intelligence: Current State of Knowledge, Innovations, Clinical Applications, Challenges and Future Perspectives

Authors Details

Ibrahim Alkassoum Salifou^{1*}

Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger.

Abdel Nacer Amoukou Issaka²

Caisse Nationale de Sécurité Sociale (CNSS), Agadez, Niger.

Amadou Bouba Traore Hassane³

Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi, Maradi, Niger.

Zeinabou Tondi Moussa⁴

Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger.

Abdou Atté Bachir⁵

Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger.

Djibrilla Baoua Bonkano⁶

Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger.

Djongolé Hassane Moussa⁷

Faculté des Sciences de la Santé, Université André Salifou de Zinder, Zinder, Niger.

Oumar Ousmane⁸

Ministère de la Santé Publique, Direction Régionale de la Santé Publique d'Agadez,
Agadez, Niger.

Roukayatou Karimou Issaka⁹

Centre Hospitalier Régional (CHR) d'Agadez, Service de Pédiatrie, Agadez, Niger.

Abibou Adamou¹⁰

Centre Hospitalier Régional (CHR) d'Agadez, Service de Chirurgie, Agadez, Niger.

Sani Rachid¹¹

Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger.

Adama Saidou¹²

Hôpital Général de Référence (HGR), Niamey, Niger.

Habibou Abarchi¹³

Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger.

Abdoul Karimoun Salifou¹⁴

Hôpital National de Niamey (HNN), Niamey, Niger.

Kadre Alio Ousmane¹⁵

Hôpital National de Niamey (HNN), Niamey, Niger.

Abdoul Wahab Mohamed Alassane¹⁶

Hôpital Général de Référence (HGR), Niamey, Niger.

Corresponding Author Details

Pr Agrégé Ibrahim Alkassoum Salifou—enseignant-chercheur (santé publique), Faculté des Sciences de la Santé, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger.

E-mail: ibrahim_alkassoum@yahoo.fr

Tél.: (+227) 90 63 01 47

Résumé structuré

Contexte. La chirurgie assistée par ordinateur connaît une transformation accélérée depuis l'intégration de l'intelligence artificielle (IA), de l'apprentissage profond et de la robotique de nouvelle génération, redéfinissant la planification, la navigation et la prise de décision chirurgicales.

Objectif. Dresser une synthèse critique et actualisée (2020-2026) des données disponibles sur la chirurgie assistée par ordinateur intégrant l'IA en chirurgie générale, ses applications cliniques, ses résultats, ses limites et ses perspectives.

Sources des données. Revue narrative structurée de la littérature indexée sur PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science et la Cochrane Library, complétée par les publications des revues à haut facteur d'impact (The Lancet, JAMA Surgery, Annals of Surgery, British Journal of Surgery, Nature Medicine, npj Digital Medicine, Artificial Intelligence in Medicine), en privilégiant essais randomisés, méta-analyses et revues systématiques publiés entre 2020 et 2026.

Synthèse des résultats. Les données actuelles montrent des bénéfices périopératoires reproductibles (pertes sanguines, conversions, durée de séjour) de la robotique assistée par IA dans plusieurs spécialités digestives, une amélioration de la sécurité peropératoire par la vision par ordinateur, et des modèles prédictifs supérieurs aux scores classiques pour le risque de complications. La preuve reste toutefois hétérogène, les essais randomisés de bonne qualité méthodologique demeurent minoritaires, les coûts sont élevés et les enjeux éthiques (biais, responsabilité, gouvernance) restent partiellement résolus.

Conclusion. L'IA transforme progressivement la chirurgie générale d'une discipline exécutrice vers une discipline prédictive et adaptative, mais son adoption généralisée nécessite une évaluation rigoureuse selon des cadres méthodologiques reconnus (IDEAL), une gouvernance éthique robuste et une réduction des inégalités d'accès.

Mots-clés (MeSH): *Intelligence artificielle; Chirurgie assistée par ordinateur; Procédures de chirurgie robotisée; Apprentissage profond; Apprentissage automatique; Réalité augmentée; Chirurgie générale; Prise de décision clinique assistée par ordinateur.*

1. Introduction

Depuis les premiers bras télémanipulateurs des années 1980 jusqu'aux plateformes robotiques modulaires actuelles, la chirurgie assistée par ordinateur (CAO) a progressivement transformé la pratique chirurgicale ⁽¹⁾ ⁽²⁾. L'apparition de systèmes de navigation numérique, puis, plus récemment, l'intégration massive de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage profond, ont initié une nouvelle révolution, qualifiée de «transformation numérique de la chirurgie» ⁽³⁾. Cette révolution dépasse la seule robotique: elle englobe l'imagerie peropératoire enrichie, la vision par ordinateur appliquée à l'analyse vidéo, les modèles prédictifs de risque et, plus récemment encore, les grands modèles de langage et les jumeaux numériques ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾.

En chirurgie générale, cette évolution touche l'ensemble du parcours de soins: planification préopératoire fondée sur la reconstruction tridimensionnelle, navigation et reconnaissance anatomique peropératoires, prédiction et prévention des complications postopératoires ⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾. L'intérêt clinique de ces outils repose sur une promesse ambitieuse: réduire la variabilité inter-opérateur, sécuriser les temps opératoires critiques et personnaliser la prise en charge selon le profil de risque individuel du patient ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾.

Cette accélération technologique s'accompagne toutefois d'un besoin croissant d'évaluation rigoureuse. La multiplication des publications, souvent monocentriques et rétrospectives, contraste avec la rareté des essais randomisés de haute qualité méthodologique et avec l'hétérogénéité persistante des critères de jugement rapportés ⁽¹⁰⁾. Les instances internationales appellent désormais à un encadrement structuré du développement et de l'évaluation de ces technologies, sur le modèle du cadre IDEAL déjà utilisé pour l'innovation chirurgicale ⁽¹¹⁾.

C'est dans ce contexte que se justifie la présente mise au point: offrir aux chirurgiens généraux, aux chercheurs en santé numérique et aux décideurs une synthèse critique, et non une simple compilation, des données disponibles entre 2020 et 2026. Les objectifs de cet article sont: définir les concepts fondamentaux du domaine; retracer son évolution historique; décrire les technologies actuelles et leurs applications par spécialité digestive; analyser les résultats cliniques, les avantages et les limites documentés; discuter les enjeux éthiques et réglementaires; et proposer des perspectives et recommandations pour la pratique, la recherche et la gouvernance de l'innovation chirurgicale.

2. Concepts fondamentaux

La terminologie du domaine reste hétérogène dans la littérature, ce qui a justifié un effort récent de standardisation ⁽¹²⁾. Le Tableau 1 synthétise les définitions consensuelles des principaux concepts utilisés dans cet article, depuis la chirurgie assistée par ordinateur au sens large jusqu'aux notions plus spécifiques d'apprentissage automatique, d'apprentissage profond et de jumeau numérique.

Il convient de distinguer la navigation chirurgicale, qui repose sur un recalage spatial entre l'image préopératoire et l'anatomie peropératoire réelle, de la chirurgie guidée par l'image, notion plus large englobant tout guidage peropératoire par imagerie, avec ou sans

navigation instrumentale formelle ⁽¹²⁾ ⁽¹³⁾. De même, la réalité augmentée superpose des informations numériques au champ opératoire réel, tandis que la réalité virtuelle immerge l'utilisateur dans un environnement entièrement simulé, principalement utilisé en formation ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾. Le jumeau numérique, concept émergent, désigne une représentation virtuelle dynamique et individualisée du patient ou du système de soins, actualisée en temps réel à partir de données multimodales, avec des applications naissantes en planification et en simulation chirurgicales personnalisées ⁽¹⁶⁾ ⁽⁵⁾ ⁽¹⁷⁾.

Tableau 1. Définitions des concepts fondamentaux

Concept	Définition
Chirurgie assistée par ordinateur (CAO)	Utilisation de systèmes informatiques pour assister la planification, la navigation ou l'exécution d'un geste chirurgical ⁽¹²⁾ .
Navigation chirurgicale	Recalage spatial en temps réel entre données d'imagerie et anatomie peropératoire, guidant le geste du chirurgien ⁽¹²⁾ .
Chirurgie guidée par l'image	Utilisation peropératoire de données d'imagerie (fixes ou en temps réel) pour orienter la décision chirurgicale ⁽¹³⁾ .
Réalité augmentée	Superposition d'informations numériques (images, contours, trajectoires) sur la scène opératoire réelle ⁽¹⁴⁾ .
Réalité virtuelle	Immersion dans un environnement chirurgical entièrement simulé, utilisée en formation et en planification ⁽¹⁵⁾ .
Robotique chirurgicale	Système télémanipulé ou semi-autonome assistant l'exécution du geste opératoire ⁽²⁾ ⁽¹⁸⁾ .
Intelligence artificielle (IA)	Méthodes computationnelles capables d'exécuter des tâches nécessitant normalement un raisonnement humain ⁽⁹⁾ .
Apprentissage automatique	Sous-domaine de l'IA permettant à un système d'améliorer ses performances à partir de données, sans programmation explicite ⁽⁹⁾ .
Apprentissage profond	Sous-domaine du machine learning fondé sur des réseaux de neurones multicouches, performant en analyse d'image ⁽¹⁹⁾ .
Vision par ordinateur	Discipline de l'IA dédiée à l'interprétation automatique d'images et de vidéos (phases, instruments, anatomie) ⁽⁶⁾ .
Jumeau numérique	Représentation virtuelle dynamique et individualisée d'un patient ou d'un système, actualisée par des données réelles ⁽¹⁶⁾ ⁽⁵⁾ .

3. Évolution historique

L'histoire de la CAO peut être découpée en quatre grandes phases (Figure 1, Tableau 2). La première, mécanique et télémanipulée (1985-2000), débute avec l'adaptation du bras industriel PUMA 560 à la neurochirurgie stéréotaxique, se poursuit avec le système AESOP, premier robot approuvé par la FDA pour le positionnement endoscopique, et le système ZEUS, qui permet en 2001 la première téléchirurgie transatlantique. Elle culmine avec l'approbation du système da Vinci pour la chirurgie générale en 2000, qui devient la plateforme dominante pendant plus de quinze ans ⁽¹⁾.

La deuxième phase, celle de la navigation numérique (2000-2015), voit le développement des systèmes de recalage d'images, de la reconstruction 3D préopératoire et des premiers essais de réalité augmentée peropératoire, en particulier en chirurgie hépatobiliaire ⁽²⁰⁾ ⁽²¹⁾.

La troisième phase, celle de l'apprentissage profond (2015-2020), est marquée par l'application de réseaux de neurones convolutifs à l'analyse vidéo peropératoire, avec des travaux fondateurs comme EndoNet pour la reconnaissance simultanée des phases et des instruments en coelioscopie ⁽²²⁾.

La quatrième phase, actuelle (2020-2026), correspond à la diversification concurrentielle du marché robotique, avec l'arrivée de plateformes modulaires telles que Hugo RAS, Versius et Senhance ⁽²⁾ ⁽²³⁾ ⁽²⁴⁾, à la démonstration de premières anastomoses intestinales réalisées de façon autonome par le robot STAR ⁽²⁵⁾, et à l'émergence de l'IA générative, des grands modèles de langage et des jumeaux numériques appliqués à la chirurgie ⁽²⁶⁾ ⁽⁵⁾. Cette trajectoire illustre un déplacement progressif du centre de gravité technologique : d'abord mécanique et centré sur la dextérité du geste, puis informationnel et centré sur la visualisation, il devient aujourd'hui prédictif et cognitif, centré sur l'aide à la décision ⁽⁴⁾.

Tableau 2. Grandes phases de l'évolution de la chirurgie assistée par ordinateur

Période	Phase	Caractéristiques principales	Exemples marquants
1985-2000	Ère mécanique et télémanipulée	Adaptation de bras robotisés industriels, premières téléopérations	PUMA 560, AESOP, ZEUS, da Vinci ⁽¹⁾
2000-2015	Ère de la navigation numérique	Recalage d'images, reconstruction 3D, premiers essais de réalité augmentée peropératoire	Navigation hépatique 3D ⁽²¹⁾

Période	Phase	Caractéristiques principales	Exemples marquants
2015-2020	Ère de l'apprentissage profond	Analyse vidéo peropératoire par réseaux de neurones convolutifs	EndoNet ⁽²²⁾
2020-2026	Ère de l'IA générative et de l'autonomie	Diversification robotique, autonomie partielle, LLM, jumeaux numériques	Hugo RAS, Versius, STAR, Med-PaLM ^{(23) (25) (27)}

Figure 1. Chronologie des grandes étapes de la chirurgie assistée par ordinateur

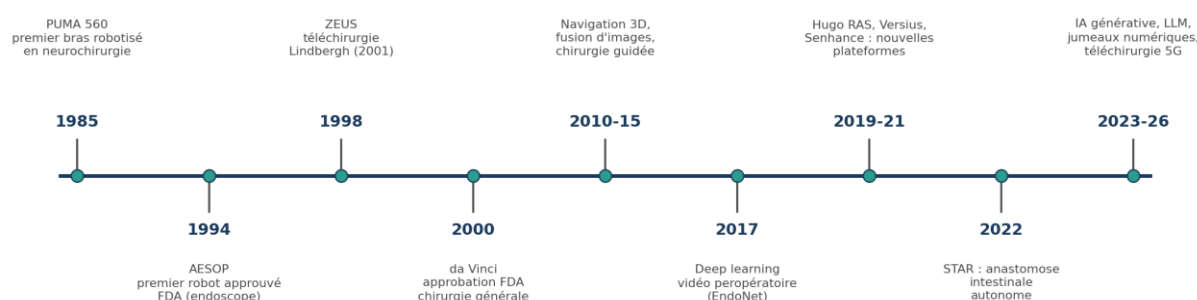


Figure 1. Chronologie des grandes étapes de la chirurgie assistée par ordinateur, de la robotique télémanipulée à l'intelligence artificielle générative ^{(1) (22) (25)}.

4. Technologies actuelles

L'imagerie peropératoire s'est enrichie de modalités fonctionnelles complémentaires à la vision blanche conventionnelle (Figure 2, Figure 4, Tableau 3). L'angiographie par fluorescence au vert d'indocyanine (ICG) permet d'évaluer la perfusion tissulaire en temps réel et a démontré, dans plusieurs essais randomisés multicentriques, une réduction du taux de fuite anastomotique en chirurgie colorectale et une amélioration de la qualité du curage ganglionnaire en chirurgie gastrique ^{(28) (29) (30)}. L'imagerie hyperspectrale, encore au stade préclinique et clinique précoce, offre une caractérisation tissulaire sans marqueur exogène, avec des applications prometteuses pour guider la résection tumorale ⁽³¹⁾.

La fusion d'images préopératoires et peropératoires, couplée à la reconstruction tridimensionnelle et à l'impression 3D, permet une planification chirurgicale personnalisée, en particulier en chirurgie hépatique complexe, bien que la précision du recalage en temps réel reste un défi technique majeur en raison de la déformation des organes mous ^{(20) (32)}.

Les systèmes de navigation peropératoire assistée par ordinateur, validés dans des études pilotes randomisées en chirurgie hépatique, visent à transposer au champ opératoire la précision déjà obtenue en neurochirurgie et en chirurgie orthopédique ⁽²¹⁾.

Le paysage de la robotique chirurgicale s'est profondément diversifié depuis 2020, la plateforme da Vinci devant désormais composer avec des concurrents directs — Hugo RAS (Medtronic), Versius (CMR Surgical) et Senhance (Asensus) — dont les comparaisons directes rapportent des résultats périopératoires globalement comparables, avec des différences mineures de temps d'installation et de coût ^{(33) (34) (24) (35) (36)}.

L'intelligence artificielle générative, fondée sur les réseaux antagonistes génératifs et plus récemment sur les modèles de diffusion, est utilisée pour la synthèse d'images médicales d'entraînement et l'augmentation de données, tandis que les grands modèles de langage commencent à être évalués comme outils d'aide à la planification et à la documentation opératoires ^{(37) (38) (39)}. Les modèles prédictifs d'IA intégrés à des systèmes d'aide à la décision ont montré, en implémentation clinique réelle, une réduction des complications et des réadmissions après chirurgie colorectale ^{(40) (41)}. Enfin, les premiers systèmes semi-autonomes ont démontré la faisabilité d'une anastomose intestinale réalisée avec supervision humaine minimale, tout en restant classés, pour la quasi-totalité des robots approuvés, aux niveaux d'autonomie les plus bas de la classification internationale de référence ^{(25) (42) (18)}.

Tableau 3. Principales technologies actuelles et leur fonction clinique

Catégorie	Exemples / systèmes	Fonction clinique principale	Maturité
Imagerie de fluorescence ICG	EssentiAL, AVOID	Évaluation de la perfusion, prévention des fuites anastomotiques	Essais de phase 3 ^{(28) (29)}
Imagerie hyperspectrale	Systèmes expérimentaux	Caractérisation tissulaire sans marqueur exogène	Préclinique ⁽³¹⁾
Fusion d'images / impression 3D	Modèles hépatiques personnalisés	Planification préopératoire individualisée	Centres experts ^{(20) (32)}
Navigation 3D	Systèmes de recalage	Guidage peropératoire en	Étude pilote

Catégorie	Exemples / systèmes	Fonction clinique principale	Maturité
peropératoire	hépatique	temps réel	randomisée ⁽²¹⁾
Plateformes robotiques	da Vinci, Hugo RAS, Versius, Senhance	Exécution télémanipulée du geste chirurgical	Clinique établie ⁽³³⁾ ⁽²⁴⁾
IA générative	GAN, modèles de diffusion	Synthèse et augmentation d'images médicales	Recherche ⁽³⁷⁾ ⁽³⁸⁾
Modèles prédictifs / aide à la décision	Scores IA de complications	Stratification du risque, prévention	Implémentation naissante ⁽⁴⁰⁾ ⁽⁴¹⁾
Systèmes semi-autonomes	Robot STAR	Exécution supervisée de gestes standardisés	Expérimental ⁽²⁵⁾

Figure 2. Architecture générique d'un système de chirurgie assistée par ordinateur intégrant l'intelligence artificielle

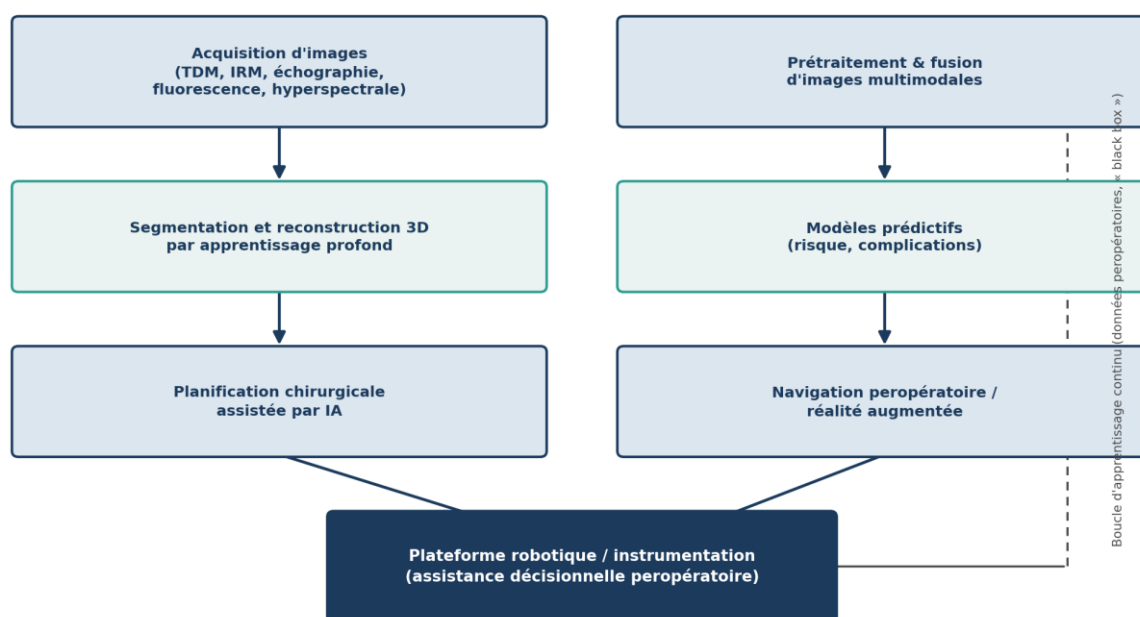


Figure 2. Architecture générique d'un système de chirurgie assistée par ordinateur intégrant l'intelligence artificielle, de l'acquisition d'images à l'assistance décisionnelle peropératoire, avec boucle d'apprentissage continu ⁽⁶⁾ ⁽⁴⁰⁾.

Figure 4. Principales familles technologiques de la chirurgie assistée par ordinateur à l'ère de l'IA

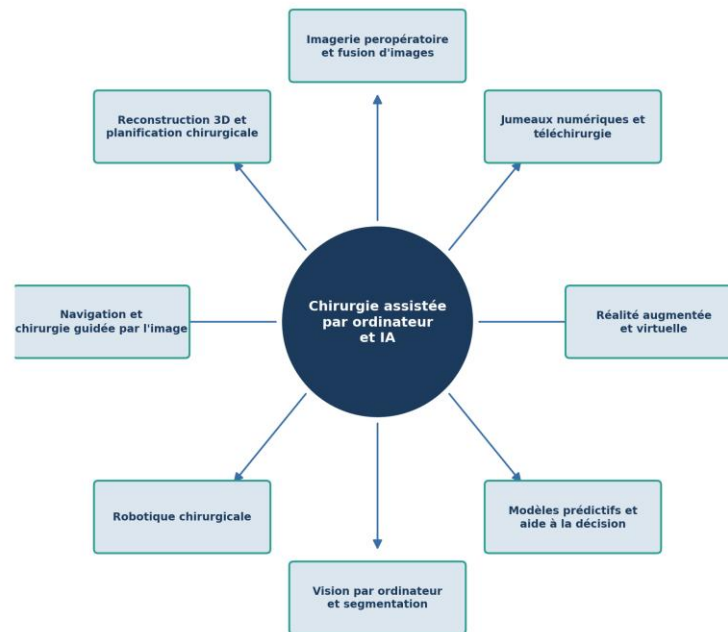


Figure 4. Principales familles technologiques de la chirurgie assistée par ordinateur à l'ère de l'intelligence artificielle.

5. Applications en chirurgie générale

Chirurgie hépatobiliaire. L'essai randomisé monocentrique ROC'N'ROLL n'a pas montré de différence significative de morbidité sévère ni de qualité de vie entre hépatectomie robotique et laparoscopique, mais a confirmé la faisabilité et la sécurité de l'approche robotique ⁽⁴³⁾. Une méta-analyse de plus de 9000 patients appariés par score de propension rapporte une réduction significative des pertes sanguines et du taux de conversion avec la robotique, sans différence de morbi-mortalité ni de survie oncologique ⁽⁴⁴⁾, résultats corroborés par une méta-analyse en réseau récente pour le carcinome hépatocellulaire ⁽⁴⁵⁾.

Chirurgie colorectale. L'essai randomisé multicentrique REAL, portant sur le cancer du rectum moyen et bas, rapporte à 3 ans une récurrence locorégionale réduite (1,6 % vs 4,0 %) et une survie sans maladie améliorée avec l'approche robotique par rapport à la laparoscopie ⁽⁴⁶⁾ ⁽⁴⁷⁾. Une méta-analyse actualisée de 11 essais randomisés confirme une réduction du taux de conversion et de la positivité de la marge circonférentielle, au prix d'un allongement modéré du temps opératoire ⁽⁴⁸⁾.

Chirurgie gastrique. Un essai randomisé de phase 2 portant sur la gastrectomie distale pour cancer résécable montre une survie sans récurrence à 3 ans significativement supérieure avec l'approche robotique (85,8 % vs 73,2 %) ⁽⁴⁹⁾, tandis que le guidage par fluorescence ICG améliore la qualité du curage ganglionnaire ⁽³⁰⁾.

Chirurgie digestive mini-invasive et pancréatique. Une méta-analyse de 17 études portant sur la duodénopancréatectomie rapporte une réduction de la morbidité globale, des transfusions et du taux de conversion avec l'approche robotique, sans surcoût opératoire significatif ⁽⁵⁰⁾ ⁽⁵¹⁾.

Chirurgie endocrinienne. La thyroïdectomie et la surrénalectomie robotiques offrent des voies d'abord sans cicatrice cervicale ou à cicatrice réduite, avec une sécurité oncologique équivalente et une meilleure qualité de vie perçue par le patient, au prix d'un temps opératoire et d'un coût plus élevés ⁽⁵²⁾ ⁽⁵³⁾ ⁽⁵⁴⁾.

Chirurgie pariétale. Les essais randomisés RIVAL (hernie inguinale) et PROVE-IT (hernie ventrale) n'ont pas démontré de bénéfice clinique significatif de la voie robotique sur la douleur, la récurrence ou la qualité de vie par rapport à la laparoscopie, malgré un temps opératoire et un coût constamment supérieurs ⁽⁵⁵⁾ ⁽⁵⁶⁾ ⁽⁵⁷⁾ ; un suivi à deux ans suggère néanmoins une tendance à moins de récurrences avec le robot ⁽⁵⁸⁾.

Chirurgie oncologique générale. Des modèles d'IA permettent désormais d'individualiser la marge de résection optimale en chirurgie hépatique métastatique et en cholangiocarcinome intrahépatique, avec un impact démontré sur la survie à long terme ⁽⁵⁹⁾ ⁽⁶⁰⁾, et commencent à être intégrés aux réunions de concertation pluridisciplinaire pour standardiser la décision oncologique ⁽⁶¹⁾ ⁽⁶²⁾.

Chirurgie d'urgence. Les calculateurs de risque fondés sur l'apprentissage automatique montrent une meilleure discrimination que les scores classiques (ASA, POSSUM) pour prédire la morbidité en chirurgie abdominale d'urgence, et des outils d'IA d'aide au triage commencent à être implémentés aux urgences ⁽⁶³⁾ ⁽⁶⁴⁾ ⁽⁶⁵⁾.

Chirurgie mini-invasive et laparoscopique assistée par IA. Les systèmes de segmentation sémantique et de reconnaissance de la vue critique de sécurité en cholécystectomie laparoscopique ont démontré une précision élevée et modifient jusqu'à 27 % des

annotations anatomiques des chirurgiens, avec un impact potentiel sur la prévention des plaies biliaires ^{(66) (67) (68) (69)}.

Tableau 4. Applications de la chirurgie assistée par ordinateur et de l'IA en chirurgie générale, par spécialité

Spécialité	Indications principales	Bénéfices rapportés	Limites	Niveau de preuve
Hépatobiliaire	Hépatectomie pour tumeurs primitives/secondaires	↓ pertes sanguines, ↓ conversion	Coût, complexité technique	ECR monocentrique + méta-analyses ^{(43) (44)}
Colorectale	Cancer rectal/colique	↓ récurrence locorégionale, ↓ conversion	Temps opératoire allongé	ECR multicentriques ^{(46) (48)}
Gastrique	Gastrectomie pour cancer résécable	↑ survie sans récurrence, meilleur curage	Données limitées hors Asie	ECR de phase 2 ⁽⁴⁹⁾
Pancréatique/digestive	Duodénopancréatectomie	↓ morbidité, ↓ transfusions, ↓ conversion	Fistule pancréatique non éliminée	Méta-analyse ⁽⁵⁰⁾
Endocrinienne	Thyroïdectomie, surrénalectomie	Qualité de vie, sécurité équivalente	Temps opératoire et coût ↑	Cohortes comparatives ^{(52) (54)}
Pariétale	Hernie inguinale/ventrale	Sécurité comparable	Pas de bénéfice net, surcoût constant	ECR (RIVAL, PROVE-IT) ^{(55) (57)}
Oncologique générale	Résections à marges critiques	Individualisation des marges, aide en RCP	Validation externe limitée	Études rétrospectives ^{(59) (60)}
Urgence	Chirurgie abdominale d'urgence, triage	Meilleure discrimination du risque	Peu d'implémentation clinique	Études multicentriques rétrospectives ⁽⁶⁴⁾

6. Intelligence artificielle en chirurgie

Au-delà de son intégration aux plateformes robotiques, l'IA irrigue désormais chaque étape du raisonnement chirurgical (Figure 3). En phase préopératoire, la segmentation automatique par apprentissage profond, dont le cadre auto-configurable nnU-Net constitue la référence méthodologique actuelle, permet une reconstruction anatomique individualisée

à partir de l'imagerie en coupes ⁽⁷⁰⁾. Ces modèles alimentent des outils d'aide à la décision qui, en chirurgie colorectale, ont démontré en implémentation clinique réelle une réduction des complications et des réadmissions ⁽⁴¹⁾.

En phase peropératoire, la vision par ordinateur permet la reconnaissance automatique des phases chirurgicales, des instruments et des structures anatomiques à partir du flux vidéo endoscopique, un domaine fondé par des travaux pionniers sur la cholécystectomie laparoscopique ^{(6) (22) (71)}. L'application la plus aboutie sur le plan de la sécurité est l'évaluation automatique de la vue critique de sécurité, dont la performance en validation externe atteint des niveaux de sensibilité et de spécificité compatibles avec un usage d'aide en temps réel ^{(8) (66) (67)}. Les architectures de segmentation d'instance, initialement développées pour la chirurgie robot-assistée, se perfectionnent grâce à des mécanismes d'attention et de fusion multi-échelle ^{(72) (73)}.

En phase postopératoire, les modèles de prédiction du risque de complications, entraînés sur des données pré- et peropératoires combinées, surpassent systématiquement les scores de risque classiques dans les études comparatives, qu'il s'agisse de réseaux de neurones explicables ou de scores hybrides comme le SUMPOT ^{(7) (74) (75) (76)}.

L'arrivée des grands modèles de langage (LLM) constitue une rupture méthodologique récente. Des modèles comme GPT-4 ou Med-PaLM atteignent des performances proches du niveau expert sur des évaluations de connaissances cliniques et chirurgicales ^{(77) (26) (27)}, et sont désormais testés pour la prédiction du risque périopératoire à partir de notes cliniques non structurées ⁽⁷⁸⁾. L'IA multimodale, qui intègre imagerie, texte et signaux physiologiques au sein d'un même modèle, est présentée comme la prochaine étape de cette évolution ⁽⁷⁹⁾. Enfin, l'essor des dispositifs d'enregistrement peropératoire de type «boîte noire chirurgicale» constitue une infrastructure de données indispensable à l'entraînement continu de ces modèles, tout en documentant objectivement les écarts de pratique ^{(80) (81)}.

Malgré ces avancées, une méta-analyse récente portant sur 188 études de compréhension de la scène chirurgicale par IA souligne que moins de 6 % d'entre elles rapportent une translation clinique réelle, révélant un écart persistant entre performance algorithmique et impact clinique démontré ⁽¹⁰⁾.

Figure 3. Intégration de l'intelligence artificielle tout au long du parcours chirurgical



Figure 3. Intégration de l'intelligence artificielle aux trois phases du parcours chirurgical : préopératoire, peropératoire et postopératoire ⁽⁴⁾.

7. Résultats cliniques

Les données cumulées entre 2020 et 2026 permettent de dégager des tendances cohérentes, bien qu'hétérogènes selon les procédures. Sur le plan de la mortalité, aucune différence significative n'a été démontrée entre chirurgie robotique/assistée par IA et chirurgie conventionnelle dans les essais randomisés disponibles, qu'il s'agisse de chirurgie hépatique, colorectale ou pariétale ^{(43) (48) (58)}. La morbidité globale est en revanche réduite dans plusieurs méta-analyses, notamment en chirurgie hépatique (réduction des complications majeures pouvant atteindre 56 % par rapport à la chirurgie ouverte) et pancréatique ^{(45) (50)}.

Les pertes sanguines peropératoires sont systématiquement diminuées avec l'approche robotique en chirurgie hépatique et surrénalienne ^{(44) (52)}. Le taux de conversion en chirurgie ouverte est également réduit de façon reproductible ^{(44) (48) (52)}. La durée d'hospitalisation est raccourcie de quelques heures à quelques jours selon les procédures, sans que ce bénéfice ne soit systématiquement retrouvé en chirurgie pariétale ^{(45) (50) (82)}.

Sur le plan de la sécurité peropératoire, les systèmes d'IA de reconnaissance anatomique modifient les annotations des chirurgiens dans près de 27 % des cas analysés, avec une majorité de ces modifications jugées plus sûres a posteriori ⁽⁶⁹⁾, tandis que l'évaluation automatique de la vue critique de sécurité atteint une précision supérieure à 0,97 dans les cohortes de validation ⁽⁶⁶⁾.

Les résultats oncologiques (marges de résection, récurrence locorégionale, survie sans maladie) sont comparables ou favorables à la robotique assistée par IA dans les essais randomisés les plus robustes en chirurgie rectale et gastrique ^{(46) (49)}, bien que ces bénéfices restent à confirmer dans des populations plus larges et diversifiées.

La qualité de vie postopératoire est globalement équivalente entre approches robotique et laparoscopique dans les essais randomisés de chirurgie pariétale ⁽⁵⁷⁾, avec un bénéfice net rapporté dans des cohortes prospectives multi-spécialités, en particulier dans les premières semaines postopératoires ⁽⁸³⁾. Enfin, l'analyse coût-efficacité demeure le point faible du dossier: les revues systématiques d'évaluations économiques complètes rapportent un surcoût constant, initial et récurrent, de la chirurgie robotique, compensé de façon inconstante par la réduction de la durée de séjour selon la procédure et le contexte hospitalier ^{(84) (85) (86)}.

Tableau 6. Niveaux de preuve scientifique par domaine technologique

Domaine	Type de preuve disponible	Niveau (Oxford CEBM, approx.)	Références clés
Robotique vs laparoscopie (colorectal)	Essais randomisés multicentriques + méta-analyses	Niveau 1	(46) (48)
Robotique vs laparoscopie (hépatique)	1 ECR monocentrique + méta-analyses observationnelles	Niveau 1-2	(43) (44)
Robotique (hernie)	Essais randomisés multicentriques	Niveau 1	(55) (57)
IA de reconnaissance anatomique peropératoire	Études de validation multicentrique, pas d'ECR	Niveau 3-4	(66) (69)
Modèles prédictifs de complications	Études de cohorte, 1 étude d'implémentation clinique	Niveau 2-3	(41) (7)
Grands modèles de	Études de performance	Niveau 4-5	(78) (77)

Domaine	Type de preuve disponible	Niveau (Oxford CEBM, approx.)	Références clés
langage en chirurgie	rétrospectives		
Téléchirurgie (5G)	Séries cliniques, pas d'ECR	Niveau 4	(87) (88)
Coût-efficacité de la robotique	Revue systématique d'évaluations économiques	Niveau 2 (preuve économique)	(84) (86)

8. Avantages

Pour le chirurgien, ces technologies offrent une meilleure ergonomie, une vision tridimensionnelle agrandie, un filtrage du tremblement physiologique et, avec l'assistance de l'IA, une réduction de la charge cognitive lors des étapes critiques grâce à des alertes de sécurité en temps réel ^{(8) (9)}. Elles ouvrent également la voie à une évaluation objective et continue des compétences techniques, utile à la formation et au maintien des compétences ^{(89) (90)}.

Pour le patient, les bénéfices documentés incluent une réduction des pertes sanguines et du taux de conversion, une possible diminution des complications majeures selon les procédures, et, pour certaines interventions, une amélioration de la qualité de vie perçue et du résultat esthétique ^{(44) (52) (54)}. La prédiction individualisée du risque opératoire permet en outre une meilleure information préopératoire et une adaptation personnalisée de la stratégie chirurgicale ^{(7) (78)}.

Pour l'hôpital, l'implémentation de ces technologies constitue un argument d'attractivité et de structuration de filières de soins spécialisées, tout en générant des données peropératoires exploitables pour l'amélioration continue de la qualité, notamment via les dispositifs de type « boîte noire chirurgicale » ^{(80) (81)}. Pour le système de santé, au-delà du potentiel de réduction des réadmissions et des durées de séjour dans certaines indications ⁽⁴¹⁾, ces technologies pourraient à terme contribuer à une meilleure allocation des ressources chirurgicales par la stratification du risque en amont, bien que ce bénéfice systémique reste largement à démontrer à l'échelle populationnelle ^{(64) (65)}.

9. Limites

Le coût d'acquisition, de maintenance et de consommables des plateformes robotiques demeure l'obstacle le plus documenté, avec un surcoût rarement compensé par les gains cliniques dans les analyses médico-économiques disponibles ⁽⁸⁴⁾ ⁽⁸⁵⁾. Ce coût s'accompagne d'exigences d'infrastructure et de maintenance technique spécialisée, qui limitent l'accès à ces technologies pour les établissements aux ressources restreintes. La courbe d'apprentissage reste par ailleurs significative pour l'ensemble des plateformes robotiques et des outils d'IA peropératoire, avec une variabilité importante selon l'expérience préalable en chirurgie laparoscopique ⁽⁹⁰⁾ ⁽⁸⁹⁾.

Sur le plan de la cybersécurité, les plateformes robotiques connectées et les dispositifs d'enregistrement peropératoire exposent à des vulnérabilités spécifiques (interception de flux, altération de commande, atteinte à la confidentialité des données), nécessitant des stratégies de protection multicouches encore inégalement déployées ⁽⁹¹⁾. Les biais algorithmiques constituent une limite majeure et insuffisamment quantifiée en chirurgie : les modèles entraînés sur des cohortes peu diversifiées risquent de reproduire ou d'amplifier des inégalités de prise en charge selon l'origine ethnique, le sexe ou le niveau socio-économique des patients ⁽⁹²⁾ ⁽⁹³⁾.

La question de la responsabilité médicale en cas de défaillance ou de recommandation erronée d'un système d'IA demeure juridiquement non stabilisée dans la plupart des juridictions, en particulier lorsque l'autonomie décisionnelle du système augmente ⁽⁹⁴⁾ ⁽⁹⁵⁾. Enfin, l'acceptabilité de ces outils par les chirurgiens et les patients reste hétérogène, freinée par le manque de transparence de certains algorithmes, la crainte d'une perte d'autonomie professionnelle et l'insuffisance des données de validation externe, retrouvée dans plus de 90 % des études de compréhension de scène chirurgicale par IA ⁽¹⁰⁾.

Tableau 5. *Bénéfices et limites de la chirurgie assistée par ordinateur et l'IA, par acteur*

Acteur	Bénéfices	Limites
Chirurgien	Ergonomie, vision 3D, alertes de sécurité en temps réel ⁽⁸⁾	Courbe d'apprentissage, dépendance technologique ⁽⁹⁰⁾
Patient	↓ pertes sanguines/conversion,	Coût résiduel, hétérogénéité de la

Acteur	Bénéfices	Limites
	information personnalisée du risque (44)	preuve selon la procédure
Hôpital	Attractivité, structuration de filières, données qualité (80)	Investissement initial, maintenance, infrastructure (84)
Système de santé	Potentiel de réduction des réadmissions (41)	Rapport coût-efficacité incertain, risque d'inégalités d'accès (86)

10. Défis éthiques

L'intégration de l'IA au standard de soins chirurgical modifie la portée du consentement éclairé : le patient doit désormais être informé non seulement des risques inhérents au geste, mais aussi du rôle, des limites et du niveau de validation de l'outil algorithmique utilisé ⁽⁹⁶⁾. Cette exigence se heurte à l'opacité de certains modèles d'apprentissage profond, dont les décisions demeurent difficilement explicables malgré les progrès de l'IA interprétable, posant un défi de transparence algorithmique encore mal résolu ⁽⁹²⁾.

L'équité constitue un second enjeu majeur : les biais de représentativité dans les données d'entraînement peuvent se traduire par des performances différentielles selon les populations, avec un risque d'aggravation des inégalités de santé si ces biais ne sont pas activement recherchés et corrigés à chaque étape du cycle de vie du modèle ⁽⁹²⁾ ⁽⁹³⁾. La responsabilité juridique en cas de préjudice reste un chantier ouvert : les cadres de responsabilité civile classiques s'adaptent difficilement à des systèmes dont les décisions résultent de processus d'apprentissage distribués et évolutifs, ce qui alimente un débat doctrinal sur le partage de responsabilité entre chirurgien, établissement, fabricant et concepteur de l'algorithme ⁽⁹⁴⁾ ⁽⁹⁵⁾.

La protection des données constitue un impératif renforcé par la nature sensible et volumineuse des données chirurgicales, exposées à des risques de cybersécurité spécifiques et nécessitant une gouvernance dédiée ⁽⁹¹⁾. Enfin, la gouvernance de l'IA en santé se structure progressivement à l'échelle internationale, avec les principes directeurs de l'Organisation mondiale de la santé ⁽⁹⁷⁾ et, en Europe, l'entrée en application du règlement sur l'intelligence artificielle (AI Act), qui classe la majorité des dispositifs d'IA chirurgicale

parmi les systèmes à haut risque soumis à des obligations renforcées de conformité et de surveillance post-commercialisation ⁽⁹⁸⁾.

11. Perspectives futures

La chirurgie autonome demeure l'horizon le plus débattu du domaine. La classification de référence distingue six niveaux d'autonomie, du contrôle manuel total à l'autonomie complète sans supervision humaine ⁽¹⁸⁾; or, une revue systématique récente des robots chirurgicaux approuvés par la FDA montre que la quasi-totalité de ces dispositifs se situe encore aux niveaux les plus bas de cette échelle, la démonstration d'anastomoses intestinales autonomes supervisées restant, à ce jour, un jalon expérimental plutôt qu'une réalité clinique généralisée ^{(25) (42)}.

L'IA générative devrait continuer à transformer la simulation chirurgicale et la synthèse de données d'entraînement rares ^{(37) (38) (27)}. Ces développements s'inscrivent dans une dynamique plus large de chirurgie personnalisée et de médecine de précision, où la stratification individuelle du risque et l'individualisation des marges de résection deviennent des standards émergents ^{(59) (60)}. Les jumeaux numériques du patient, encore à un stade conceptuel et préclinique pour la majorité des applications chirurgicales, pourraient permettre à terme une planification et une répétition virtuelle du geste opératoire propres à chaque patient, à condition de résoudre les défis d'interopérabilité des données qui freinent actuellement leur translation ^{(5) (17)}.

La réalité mixte et la chirurgie connectée, intégrant capteurs peropératoires et plateformes de télésurveillance, dessinent les contours d'un bloc opératoire de plus en plus instrumenté et interconnecté ^{(14) (99)}. La télésurveillance périopératoire à distance a démontré un bénéfice clinique dans un essai randomisé récent en chirurgie oncologique ⁽⁹⁹⁾ et dans une méta-analyse portant sur le suivi postopératoire à domicile ⁽¹⁰⁰⁾. Enfin, la téléchirurgie, dont la faisabilité a été établie par plusieurs séries cliniques utilisant les réseaux 5G à faible latence ^{(87) (88)}, et la robotique collaborative restent des perspectives prometteuses dont l'implémentation à grande échelle nécessite encore une validation réglementaire et une infrastructure réseau robuste, en particulier dans les zones géographiquement isolées.

Tableau 7. Perspectives futures et horizon estimé d'implémentation

Perspective	Horizon estimé	Principal enjeu
Chirurgie semi-autonome supervisée	5-10 ans	Validation réglementaire, responsabilité juridique ⁽⁴²⁾
IA générative / LLM chirurgicaux	2-5 ans	Fiabilité, hallucinations, validation clinique ⁽²⁷⁾
Jumeaux numériques du patient	5-10 ans	Interopérabilité des données, validation clinique ⁽¹⁷⁾
Téléchirurgie à grande échelle	5-10 ans	Infrastructure réseau, régulation transfrontalière ⁽⁸⁷⁾
Chirurgie connectée / télésurveillance	1-3 ans	Intégration aux dossiers patients, remboursement ⁽⁹⁹⁾
Gouvernance de l'IA chirurgicale	En cours	Harmonisation internationale des cadres réglementaires ⁽⁹⁸⁾

12. Recommandations

Pour les cliniciens, l'adoption de ces outils devrait s'accompagner d'une formation structurée et objectivement évaluée, d'une vigilance active envers les biais et les limites de validation externe des systèmes utilisés, et du maintien d'une supervision humaine décisionnelle finale, quel que soit le niveau d'assistance algorithmique ⁽⁹⁰⁾ ⁽¹⁰⁾.

Pour les chercheurs, la priorité devrait aller à la conduite d'essais randomisés multicentriques de meilleure qualité méthodologique, au rapport systématique des critères de validation externe et de translation clinique, et à l'adoption de cadres d'évaluation étagés comme le cadre IDEAL, spécifiquement adapté à la robotique et à l'IA chirurgicales ⁽¹¹⁾ ⁽¹⁰⁾.

Pour les décideurs et régulateurs, l'enjeu est de consolider une gouvernance proportionnée au risque, s'appuyant sur les principes de l'Organisation mondiale de la santé et sur les cadres réglementaires en cours de déploiement, tout en anticipant les obligations de

traçabilité, de surveillance post-commercialisation et de gestion des biais algorithmiques ^{(97) (98)}.

Pour les universités et les structures de formation, l'intégration précoce des compétences en IA, en science des données chirurgicales et en éthique numérique dans les cursus de chirurgie générale apparaît indispensable pour préparer la prochaine génération de chirurgiens à un exercice hybride entre geste manuel et supervision algorithmique ⁽⁸⁹⁾.

Pour les pays à ressources limitées, une stratégie d'adoption réaliste devrait privilégier les outils d'IA à faible coût d'infrastructure (aide à la décision, triage, prédiction du risque à partir de données cliniques courantes) plutôt que l'acquisition prioritaire de plateformes robotiques coûteuses, tout en s'appuyant sur la téléchirurgie et la télé-expertise pour réduire les inégalités d'accès à l'expertise chirurgicale spécialisée ^{(87) (88)}.

13. Conclusion

La chirurgie assistée par ordinateur à l'ère de l'intelligence artificielle ne constitue plus une perspective prospective mais une réalité clinique en cours de consolidation, comme en témoignent les essais randomisés multicentriques désormais disponibles dans plusieurs spécialités digestives ^{(43) (46) (49)}. Trois messages clés se dégagent de cette mise au point. Premièrement, les bénéfices périopératoires de la robotique et de l'IA assistée sont réels mais hétérogènes, plus nets sur les critères de sécurité peropératoire que sur la mortalité ou les résultats oncologiques à long terme, globalement comparables aux approches conventionnelles ^{(44) (48)}. Deuxièmement, la vision par ordinateur et les modèles prédictifs transforment déjà la sécurité peropératoire et la stratification du risque, mais l'écart entre performance algorithmique en recherche et translation clinique validée demeure important ⁽¹⁰⁾. Troisièmement, les défis éthiques, économiques et réglementaires — biais algorithmiques, responsabilité juridique, coût, gouvernance — ne sont pas des obstacles périphériques mais des conditions structurantes de l'adoption durable de ces technologies ^{(92) (94) (98)}.

Les priorités de recherche pour les années à venir devraient porter sur la production d'essais randomisés de meilleure qualité méthodologique, la validation externe multicentrique et multiculturelle des modèles d'IA, l'évaluation médico-économique rigoureuse selon des méthodologies standardisées, et le développement de cadres de

gouvernance éthique opérationnels. À cette condition, la chirurgie générale pourra pleinement bénéficier de la transition d'une discipline principalement exécutrice vers une discipline prédictive, personnalisée et adaptative, sans reproduire les inégalités d'accès qui ont historiquement accompagné l'adoption des innovations chirurgicales coûteuses ⁽¹¹⁾ (86).

Références (style Vancouver)

1. Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery: from AESOP and ZEUS to da Vinci. *J Visc Surg.* 2011;148(5 Suppl):e3-8. doi:10.1016/j.jviscsurg.2011.04.007
2. Sighinolfi MC, Sarchi L, Gaia G, et al. Multimodular robotic systems (Hugo RAS and Versius CMR) for pelvic surgery: tasks and perspectives from the bed-side assistant. *J Robot Surg.* 2023;17(6):3039-3043. doi:10.1007/s11701-023-01718-4
3. Marwaha JS, Raza MM, Kvedar JC. The digital transformation of surgery. *NPJ Digit Med.* 2023;6(1):103. doi:10.1038/s41746-023-00846-3
4. Varghese C, Harrison EM, O'Grady G, Topol EJ. Artificial intelligence in surgery. *Nat Med.* 2024;30(5):1257-1268. doi:10.1038/s41591-024-02970-3
5. Asciak L, Kyeremeh J, Luo X, et al. Digital twin assisted surgery: concept, opportunities, and challenges. *NPJ Digit Med.* 2025;8(1):32. doi:10.1038/s41746-024-01413-0
6. Mascagni P, Alapatt D, Sestini L, et al. Computer vision in surgery: from potential to clinical value. *NPJ Digit Med.* 2022;5(1):163. doi:10.1038/s41746-022-00707-5
7. Xue B, Li D, Lu C, et al. Use of machine learning to develop and evaluate models using preoperative and intraoperative data to identify risks of postoperative complications. *JAMA Netw Open.* 2021;4(3):e212240. doi:10.1001/jamanetworkopen.2021.2240
8. Mascagni P, Vardazaryan A, Alapatt D, et al. Artificial intelligence for surgical safety: automatic assessment of the critical view of safety in laparoscopic cholecystectomy using deep learning. *Ann Surg.* 2022;275(5):955-961. doi:10.1097/SLA.0000000000004351

9. Hashimoto DA, Rosman G, Rus D, Meireles OR. Artificial intelligence in surgery: promises and perils. *Ann Surg.* 2018;268(1):70-76. PMID:29389679
10. Carstens M, Vasisht S, Zhang Z, et al. Artificial intelligence for surgical scene understanding: a systematic review and reporting quality meta-analysis. *NPJ Digit Med.* 2025;9(1):59. doi:10.1038/s41746-025-02227-4
11. Marcus HJ, et al; IDEAL Robotics Colloquium. The IDEAL framework for surgical robotics: development, comparative evaluation and long-term monitoring. *Nat Med.* 2024;30(1):61-75. doi:10.1038/s41591-023-02732-7
12. Gimenez ME, Gallix B, Costamagna G, et al. Definitions of computer-assisted surgery and intervention, image-guided surgery and intervention, hybrid operating room, and guidance systems. *Ann Surg Open.* 2020;1(2):e021. doi:10.1097/AS9.0000000000000021
13. Modern image-guided surgery: a narrative review of medical image processing and visualization. *Sensors (Basel).* 2023;23(24):9872. PMC10748263
14. Barcali E, Iadanza E, Manetti L, Francia P, Nardi C, Bocchi L. Augmented reality in surgery: a scoping review. *Appl Sci.* 2022;12(14):6890. doi:10.3390/app12146890
15. The application of virtual reality in the training of laparoscopic surgery: a systematic review and meta-analysis. *Int J Surg.* 2021. PMID:33307244
16. Katsoulakis E, Wang Q, Wu H, et al. Digital twins for health: a scoping review. *NPJ Digit Med.* 2024;7(1):77. doi:10.1038/s41746-024-01073-0
17. Mekki YM, Luijten G, Hagert E, Belkhair S, Varghese C, Qadir J, et al. Digital twins for the era of personalized surgery. *NPJ Digit Med.* 2025;8(1):283. doi:10.1038/s41746-025-01575-5
18. Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics: regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Sci Robot.* 2017;2(4):eaam8638. doi:10.1126/scirobotics.aam8638
19. Esteva A, Chou K, Yeung S, et al. Deep learning-enabled medical computer vision. *NPJ Digit Med.* 2021;4(1):5. doi:10.1038/s41746-020-00376-2

20. Ali S, Espinel Y, Jin Y, et al. An objective comparison of methods for augmented reality in laparoscopic liver resection by preoperative-to-intraoperative image fusion from the MICCAI2022 challenge. *Med Image Anal.* 2025. PMID:39488186
21. Computer-assisted intraoperative 3D-navigation for liver surgery: a prospective randomized-controlled pilot study. PMC10477660
22. Twinanda AP, Shehata S, Mutter D, Marescaux J, de Mathelin M, Padoy N. EndoNet: a deep architecture for recognition tasks on laparoscopic videos. *IEEE Trans Med Imaging.* 2017;36(1):86-97. doi:10.1109/TMI.2016.2593957
23. Ngu JC, Lin CC, Sia CJ, Teo NZ. A narrative review of the Medtronic Hugo RAS and technical comparison with the Intuitive da Vinci robotic surgical system. *J Robot Surg.* 2024;18(1):99. doi:10.1007/s11701-024-01838-5
24. Safe implementation of a next-generation surgical robot: first analysis of 2083 cases in the Versius surgical registry. *Ann Surg.* 2023;278(4). doi:10.1097/SLA.0000000000005871
25. Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis. *Sci Robot.* 2022;7(60):eabj2908. doi:10.1126/scirobotics.abj2908
26. Singhal K, Azizi S, Tu T, et al. Large language models encode clinical knowledge. *Nature.* 2023;620(7972):172-180. doi:10.1038/s41586-023-06291-2
27. Singhal K, Tu T, Gottweis J, et al. Toward expert-level medical question answering with large language models. *Nat Med.* 2025;31:943-950. doi:10.1038/s41591-024-03423-7
28. de Nardi P, Elmore U, Maggi G, et al. Blood perfusion assessment by indocyanine green fluorescence imaging for minimally invasive rectal cancer surgery (EssentiAL trial): a randomized clinical trial. *Ann Surg.* 2023;278(4):e751-e757. PMID:37026391
29. Chadi SA, et al. Indocyanine green near-infrared fluorescence bowel perfusion assessment to prevent anastomotic leakage in minimally invasive colorectal surgery

(AVOID): a multicentre, randomised, controlled, phase 3 trial. *Lancet Gastroenterol Hepatol*. 2024. doi:10.1016/S2468-1253(24)00198-5

30. Chen QY, Xie JW, Zhong Q, et al. Indocyanine green fluorescence imaging-guided versus conventional laparoscopic lymphadenectomy for gastric cancer: long-term outcomes of a phase 3 randomised clinical trial. *Nat Commun*. 2023;14:7413. doi:10.1038/s41467-023-42712-6
31. Hyperspectral imaging for tumor resection guidance in surgery: a systematic review of preclinical and clinical studies. PMC12327654
32. 3D printing of self-healing personalized liver models for surgical training and preoperative planning. PMC10730511
33. Head-to-head comparison of DaVinci and Hugo RAS robotic platforms for robot-assisted radical prostatectomy: a systematic review and meta-analysis of comparative studies. *Prostate Cancer Prostatic Dis*. 2024. doi:10.1038/s41391-024-00908-x
34. Comparison of outcomes in robot-assisted colon cancer surgery using Da Vinci Xi, Hugo RAS, and Versius: the COMPAR-CRC multiplatform study. 2025.
35. Robotic cholecystectomy using Senhance robotic platform versus laparoscopic conventional cholecystectomy: a propensity score analysis. PMID:33502944
36. Robot-assisted radical resection of colorectal cancer using the KangDuo surgical robot versus the da Vinci Xi robotic system: short-term outcomes of a multicentre randomised controlled noninferiority trial. *Surg Endosc*. 2024. PMID:38307959
37. GANs for medical image synthesis: an empirical study. *J Imaging*. 2023;9(3):69. doi:10.3390/jimaging9030069
38. Diffusion models in medical imaging: a comprehensive survey. *Med Image Anal*. 2023.
39. Clinical and surgical applications of large language models: a systematic review. *J Clin Med*. 2024;13(11):3041. doi:10.3390/jcm13113041

40. Bhandari M, et al. Artificial intelligence-enabled decision support in surgery: state-of-the-art and future directions. *Ann Surg.* 2023. doi:10.1097/SLA.0000000000005853
41. Clinical implementation of an AI-based prediction model for decision support for patients undergoing colorectal cancer surgery. *Nat Med.* 2025. doi:10.1038/s41591-025-03942-x
42. Lee A, Baker TS, Bederson JB, Rapoport BI. Levels of autonomy in FDA-cleared surgical robots: a systematic review. *NPJ Digit Med.* 2024;7(1):103. doi:10.1038/s41746-024-01102-y
43. Birgin E, Heibel M, Hetjens S, Rasbach E, Reissfelder C, Teoule P, Rahbari NN. Robotic versus laparoscopic hepatectomy for liver malignancies (ROC'N'ROLL): a single-centre, randomised, controlled, single-blinded clinical trial. *Lancet Reg Health Eur.* 2024;43:100972. doi:10.1016/j.lanepe.2024.100972
44. Wang P, Zhang D, Huang B, et al. Robotic versus laparoscopic hepatectomy: meta-analysis of propensity-score matched studies. *BJS Open.* 2025;9(2):zrae141. doi:10.1093/bjsopen/zrae141
45. Abdelsamad A, Alsharif MMA, Khalil I, et al. Robotic versus laparoscopic versus open hepatectomy for hepatocellular carcinoma: a systematic review and network meta-analysis. *J Robot Surg.* 2026;20:380. doi:10.1007/s11701-026-03344-2
46. Feng Q, Yuan W, Li T, et al. Robotic vs laparoscopic surgery for middle and low rectal cancer: the REAL randomized clinical trial. *JAMA.* 2025;334(2):136-148. doi:10.1001/jama.2025.8123
47. Feng Q, Yuan W, Li T, et al. Robotic versus laparoscopic surgery for middle and low rectal cancer (REAL): short-term outcomes of a multicentre randomised controlled trial. *Lancet Gastroenterol Hepatol.* 2022;7(11):991-1004. doi:10.1016/S2468-1253(22)00248-5
48. Zou J, Zhu H, Tang Y, Huang Y, Chi P, Wang X. Robotic versus laparoscopic surgery for rectal cancer: an updated systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Surg.* 2025;25:86. doi:10.1186/s12893-025-02805-z

49. Lu J, Xu BB, Zheng HL, et al. Robotic versus laparoscopic distal gastrectomy for resectable gastric cancer: a randomized phase 2 trial. *Nat Commun.* 2024;15:4668. doi:10.1038/s41467-024-49013-6
50. Tang G, Chen F, Chen R, Zhou R, Zhang J. Robotic versus laparoscopic pancreaticoduodenectomy for pancreatic and periampullary tumors: a meta-analysis. *Front Oncol.* 2024;14:1486504. doi:10.3389/fonc.2024.1486504
51. Comparative analysis of open, laparoscopic, and robotic pancreaticoduodenectomy: a systematic review of randomized controlled trials. *PMC12298437.* 2025.
52. Esposito G, Mullineris B, Colli G, Curia S, Piccoli M. Robotic versus laparoscopic adrenalectomy for adrenal tumors: an up-to-date meta-analysis on perioperative outcomes. *Cancers (Basel).* 2025;17(1):150. doi:10.3390/cancers17010150
53. Robotic transaxillary thyroidectomy: time to expand indications? *J Robot Surg.* 2023. doi:10.1007/s11701-023-01594-y
54. Long-term outcomes of robotic vs open thyroidectomy for differentiated thyroid cancer: efficacy, safety, and quality of life. *Int J Surg.* 2025. doi:10.1097/JS9.0000000000003835
55. Prabhu AS, Carbonell A, Hope W, et al. Robotic inguinal vs transabdominal laparoscopic inguinal hernia repair: the RIVAL randomized clinical trial. *JAMA Surg.* 2020;155(5):380-387. PMID:32186683
56. Laparoscopic versus robotic inguinal hernia repair: 1- and 2-year outcomes from the RIVAL trial. *Surg Endosc.* 2022. PMID:35578051
57. Olavarria OA, Bernardi K, Shah SK, et al. Patient-reported outcomes of robotic vs laparoscopic ventral hernia repair with intraperitoneal mesh: the PROVE-IT randomized clinical trial. *JAMA Surg.* 2021;156(1):22-29. PMID:33084881
58. Dhanani NH, Lyons NB, Olavarria OA, et al. Robotic versus laparoscopic ventral hernia repair: two-year results from a prospective, multicenter, blinded randomized clinical trial. *Ann Surg.* 2023;278(2):161-165. doi:10.1097/SLA.0000000000005903

59. Using artificial intelligence to find the optimal margin width in hepatectomy for colorectal cancer liver metastases. *JAMA Surg.* 2022. doi:10.1001/jamasurg.2022.1819
60. The application of artificial intelligence to investigate long-term outcomes and assess optimal margin width in hepatectomy for intrahepatic cholangiocarcinoma. *Ann Surg Oncol.* 2023. doi:10.1245/s10434-023-13349-y
61. Artificial intelligence in multidisciplinary tumor boards enhancing decision making and clinical outcomes in oncology. *iScience.* 2025. PMC12719209
62. Assessment of large language models in colorectal cancer multidisciplinary tumor board decision-making: a retrospective single-center comparison of guideline-integrated general-purpose vs domain-specialized models. *Curr Oncol.* 2025. doi:10.3390/curroncol33060309
63. Artificial intelligence may enhance emergency triage and management. *J Trauma Acute Care Surg.* 2023. PMID:36880782
64. Machine learning based peri-surgical risk calculator for abdominal related emergency general surgery: a multicenter retrospective study. *Int J Surg.* 2024. PMID:38489557
65. Impact of artificial intelligence-based triage decision support on emergency department care. *NEJM AI.* 2024. doi:10.1056/AIoa2400296
66. Kawamura M, Endo Y, Fujinaga A, et al. Deep learning-based automatic assessment of the critical view of safety in laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc.* 2023;37:8755-8763. doi:10.1007/s00464-023-10328-y
67. Laplante S, Namazi B, Kiani P, et al. Validation of an artificial intelligence platform for the guidance of safe laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc.* 2023;37(3):2260-2268. doi:10.1007/s00464-022-09439-9
68. Madani A, Namazi B, Altieri MS, et al. Artificial intelligence for intraoperative guidance: using semantic segmentation to identify surgical anatomy during laparoscopic cholecystectomy. *Ann Surg.* 2022;276(2):363-369. doi:10.1097/SLA.0000000000004594

69. Endo Y, Tokuyasu T, Mori Y, et al. Impact of AI system on recognition for anatomical landmarks related to reducing bile duct injury during laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc.* 2023;37(7):5752-5759. doi:10.1007/s00464-023-10224-5
70. Isensee F, Jaeger PF, Kohl SAA, Petersen J, Maier-Hein KH. nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. *Nat Methods.* 2021;18(2):203-211. doi:10.1038/s41592-020-01008-z
71. Yang HY, Hong SS, Yoon J, et al. Deep learning-based surgical phase recognition in laparoscopic cholecystectomy. *Ann Hepatobiliary Pancreat Surg.* 2024;28(4):466-473. doi:10.14701/ahbps.24-091
72. Ceron JCA, Ruiz GO, Chang L, Ali S. Real-time instance segmentation of surgical instruments using attention and multi-scale feature fusion. *Med Image Anal.* 2022;81:102569. doi:10.1016/j.media.2022.102569
73. Shvets AA, Rakhlin A, Kalinin AA, Iglovikov VI. Automatic instrument segmentation in robot-assisted surgery using deep learning. In: 17th IEEE Int Conf Mach Learn Appl (ICMLA). 2018:624-628. doi:10.1109/ICMLA.2018.00100
74. Shickel B, Loftus TJ, Ruppert M, et al. Dynamic predictions of postoperative complications from explainable, uncertainty-aware, and multi-task deep neural networks. *Sci Rep.* 2023;13:1224. doi:10.1038/s41598-023-27418-5
75. Machine learning-based prediction of early complications following surgery for intestinal obstruction: multicenter retrospective study. *J Med Internet Res.* 2025;27:e68354. doi:10.2196/68354
76. Chelazzi C, Villa G, Manno A, Ranfagni V, Gemmi E, Romagnoli S. The new SUMPOT to predict postoperative complications using an artificial neural network. *Sci Rep.* 2021;11:22692. doi:10.1038/s41598-021-01913-z
77. Beaulieu-Jones BR, Berrigan MT, Shah S, Marwaha JS, et al. Evaluating capabilities of large language models: performance of GPT-4 on surgical knowledge assessments. *Surgery.* 2024;175(4):936-942. doi:10.1016/j.surg.2023.12.014

78. Chung P, Fong CT, Walters AM, Aghaeepour N, Yetisgen M, O'Reilly-Shah VN. Large language model capabilities in perioperative risk prediction and prognostication. *JAMA Surg.* 2024;159(8):928-937. doi:10.1001/jamasurg.2024.1621
79. Acosta JN, Falcone GJ, Rajpurkar P, Topol EJ. Multimodal biomedical AI. *Nat Med.* 2022;28(9):1773-1784. doi:10.1038/s41591-022-01981-2
80. Jung JJ, Juni P, Lebovic G, Grantcharov T. First-year analysis of the operating room black box study. *Ann Surg.* 2020;271(1):122-127. PMID:29916872
81. Jung JJ, Grantcharov TP. OR black box and surgical control tower: recording and streaming data and analytics to improve surgical care. *J Pediatr Surg.* 2021. PMID:33712411
82. Clinical outcomes and cost of robotic ventral hernia repair: systematic review. *BJS Open.* 2021. PMID:34791049
83. Prospective cohort study investigating quality of life outcomes following multi-speciality robotic-assisted surgery. PMID:37148106
84. A systematic review of full economic evaluations of robotic-assisted surgery in thoracic and abdominopelvic procedures. *J Robot Surg.* 2023. doi:10.1007/s11701-023-01731-7
85. Is implementation of robotic-assisted procedures in acute care general surgery cost-effective? *J Robot Surg.* 2024. doi:10.1007/s11701-024-01912-y
86. Cost-effectiveness analysis of robotic surgery in healthcare for older individuals: a systematic review based on randomized controlled trials. *Front Public Health.* 2025. PMC12381784
87. Barba P, Stramiello J, Funk EK, Richter F, Yip MC, Orosco RK. Remote telesurgery in humans: a systematic review. *Surg Endosc.* 2022;36(5):2771-2777. doi:10.1007/s00464-022-09074-4
88. Fan S, Xu W, Diao Y, et al. Application of 5G telesurgery in urology. *Eur Urol Open Sci.* 2023;49:6-9. doi:10.1016/j.euros.2022.12.010

89. Lam K, Chen J, Wang Z, et al. Machine learning for technical skill assessment in surgery: a systematic review. *NPJ Digit Med*. 2022;5(1):24. doi:10.1038/s41746-022-00566-0
90. Boal MWE, Anastasiou D, Tesfai F, et al. Evaluation of objective tools and artificial intelligence in robotic surgery technical skills assessment: a systematic review. *Br J Surg*. 2024;111(1):znad331. doi:10.1093/bjs/znad331
91. Gordon WJ, Ikoma N, Lyu H, Jackson GP, Landman A. Protecting procedural care: cybersecurity considerations for robotic surgery. *NPJ Digit Med*. 2022;5(1):148. doi:10.1038/s41746-022-00693-8
92. Chen RJ, Wang JJ, Williamson DFK, et al. Algorithmic fairness in artificial intelligence for medicine and healthcare. *Nat Biomed Eng*. 2023;7(6):719-742. doi:10.1038/s41551-023-01056-8
93. Hasanzadeh F, Josephson CB, Waters G, Adedinsewo D, Azizi Z, White JA. Bias recognition and mitigation strategies in artificial intelligence healthcare applications. *NPJ Digit Med*. 2025;8(1):154. doi:10.1038/s41746-025-01503-7
94. Eldakak A, Alremeithi A, Dahiyat E, El-Gheriani M, Mohamed H, Abdulla MIA. Civil liability for the actions of autonomous AI in healthcare: an invitation to further contemplation. *Humanit Soc Sci Commun*. 2024;11:305. doi:10.1057/s41599-024-02806-y
95. Terranova C, Cestonaro C, Fava L, Cinquetti A. AI and professional liability assessment in healthcare: a revolution in legal medicine? *Front Med (Lausanne)*. 2024;10:1337335. doi:10.3389/fmed.2023.1337335
96. Duffourc MN, Cahill RA. Legal implications of AI standard of care integration on patients' informed consent: lessons from surgery. *NPJ Digit Med*. 2026;9(1):4. doi:10.1038/s41746-025-02157-1
97. World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance. Geneva: WHO; 2021.

98. van Kolschooten H, van Oirschot J. The EU Artificial Intelligence Act (2024): implications for healthcare. *Health Policy.* 2024;149:105152. doi:10.1016/j.healthpol.2024.105152
99. Sun V, Xiao Y, Li S, et al. Comparative effectiveness of remote perioperative telemonitoring in cancer surgery: a randomized trial. *NPJ Digit Med.* 2025;8(1):555. doi:10.1038/s41746-025-01961-z
100. Dawes AJ, Lin AY, Varghese C, Russell MM, Lin AY. Mobile health technology for remote home monitoring after surgery: a meta-analysis. *Br J Surg.* 2021;108(11):1304-1314. doi:10.1093/bjs/znab323

