



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG

Année : 2021

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

« Surgical Training 2.0 » : Une approche systématique passant en revue la littérature axée sur la chirurgie orale et maxillo-faciale

Présentée et soutenue publiquement le 02 Avril 2021 à 16 heures
au Pôle Formation
par **Patrick GRALL**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Joël FERRI

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Patrick TRUFFERT

Madame la Professeure Chrystèle RUBOD DIT GUILLET

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Romain NICOT



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG

Année : 2021

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

« Surgical Training 2.0 » : Une approche systématique passant en revue la littérature axée sur la chirurgie orale et maxillo-faciale

Présentée et soutenue publiquement le 02 Avril 2021 à 16 heures
au Pôle Formation
par **Patrick GRALL**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Joël FERRI

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Patrick TRUFFERT

Madame la Professeure Chrystèle RUBOD DIT GUILLET

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Romain NICOT

AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Préambule

Le travail scientifique présenté dans cette thèse de médecine fait l'objet de deux publications d'articles en Anglais :

- Grall P, Ferri J, Nicot R. Surgical training 2.0: A systematic approach reviewing the literature focusing on oral maxillofacial surgery - Part I. J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2021 Jan 29:S2468-7855(21)00007-0. doi: 10.1016/j.jormas.2021.01.006. Epub ahead of print. PMID: 33524605.
- Grall P, Ferri J, Nicot R. Surgical Training 2.0: A systematic approach reviewing the literature focusing on oral maxillofacial surgery - Part II. J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2020 Dec 7:S2468-7855(20)30296-2. doi: 10.1016/j.jormas.2020.11.010. Epub ahead of print. PMID: 33301948.

Table des matières

Résumé	5
1. Introduction.....	7
2. Matériel et méthodes	9
3.Résultats.....	13
3.1 Open Field Camera.....	13
3.2 Télémédecine	18
3.3 Impression 3D.....	26
3.4 Réseaux sociaux.....	40
3.5 Serious Games	49
3.6 Réalité virtuelle	57
4. Conclusion.....	67
5. Figures et Tableaux.....	69
6. Références	70

Résumé

Objectif : De nombreuses technologies font leur apparition dans le domaine médical. Faire le point sur l'arsenal technologique disponible pour la formation des nouveaux chirurgiens semble très intéressant pour guider les protocoles de formation chirurgicale futurs.

Méthode : Cet article est une approche systématique qui passe en revue les nouvelles technologies en matière de formation chirurgicale, en particulier en chirurgie orale et maxillofaciale. Cet article explore ce que les nouvelles technologies peuvent apporter par rapport aux méthodes traditionnelles dans le domaine de l'éducation chirurgicale. Une recherche structurée de la littérature sur PubMed a été exécutée dans le respect des directives PRISMA. Les articles ont été sélectionnés lorsqu'ils réunissaient les critères d'inclusion prédéfinis, tout en respectant les principaux objectifs de cette revue systématique. Nous avons étudié si l'exposition aux nouvelles technologies des étudiants en médecine, et plus particulièrement de chirurgie, améliorerait leurs compétences chirurgicales par rapport aux méthodes traditionnelles. Chaque technologie est passée au crible en étudiant ses avantages et inconvénients et en envisageant son intégration dans la pratique quotidienne.

Résultats : Les résultats sont encourageants. En effet, toutes ces technologies permettent de réduire les courbes d'apprentissage, les durées opératoires, les complications per-opératoires et déclenchent un bel enthousiasme chez les étudiants par rapport aux méthodes plus conventionnelles. Les coûts de développement, la complexité logistique et technique et l'ouverture d'esprit nécessaire sont autant d'obstacles au développement immédiat de ces nouvelles technologies. Les

principales limites à cette revue de la littérature sont que bon nombre des études ont été réalisées sur de petits effectifs, qu'elles n'étudient pas le maintien des compétences et des connaissances à long terme et qu'il y a manifestement un biais de publication.

Conclusion : Les méthodes d'éducation en chirurgie changeront probablement dans les années à venir. L'intégration de ces nouvelles technologies dans le cursus semble essentielle pour ne pas rester à la marge.

Cette revue de la littérature est inscrite sur PROSPERO.

1. Introduction

Comment devenir chirurgien ? La réponse à cette question n'a eu cesse d'évoluer au fil du temps. Rapide, audacieux et précis étaient les maîtres mots de la doctrine de la chirurgie d'antan [1]. De nos jours, le chirurgien doit acquérir des compétences techniques (examen clinique, manipulation d'instruments et compétences psychomotrices) [2], des aptitudes sociales (communication, travail d'équipe, leadership), des compétences cognitives (prise de décision, conscience de la situation) et doit optimiser ses ressources personnelles (gestion du stress et adaptation à la fatigue) [3].

Les méthodes de formation ont évolué au fil du temps. L'approche traditionnelle peut être résumée par cette phrase de Sir William Halsted: « Voir une fois, faire une fois, enseigner une fois [2]. L'enseignement chirurgical est passé du « compagnonnage » à un modèle de formation fondé sur la connaissance des sciences fondamentales, la recherche et sur une certaine responsabilité du résident vis-à-vis de ses patients. L'étudiant est passé de la génération X à la génération Y [4]. L'avènement des nouvelles technologies implique une révision des méthodes de formation, même s'il semble évident qu'une bonne connaissance théorique de base reste indispensable [5].

Actuellement, les nouvelles technologies les plus en vogue sont :

- **Open Field Camera:** L'idée est de fixer une caméra sur le front du chirurgien ou sur la table d'opération pour offrir aux observateurs le meilleur angle de vision pour pouvoir suivre l'opération sur un écran, et ce même à distance [6].

- **Télémédecine** : La télémédecine permet d'apporter l'expertise de chirurgiens expérimentés à d'autres chirurgiens ne maîtrisant pas encore certaines interventions par l'intermédiaire d'internet. [7]

- **Réseaux sociaux** : Comme Facebook ou Twitter, les réseaux sociaux permettent de partager des informations rapidement et à faible coût. Ils favorisent également les échanges entre les individus [8].

- **Serious Game**: Un serious game correspond à tous les dispositifs dans lesquels le joueur recevra du contenu éducatif de façon subtile tout en s'amusant [9].

- **Réalité virtuelle** : Il s'agit d'une simulation du monde réel basée sur l'infographie et un monde tridimensionnel (3D). Parfois, des sensations tactiles sont ajoutées pour créer une expérience plus immersive [10].

- **Impression tridimensionnelle** : Cette technologie convertit les modèles numériques 3D en modèles plastique ou résine avec une très haute fidélité à l'aide d'une imprimante spécialisée [11].

Cet article est une revue de la littérature quasi-systématique, qui étudie la place de ces nouvelles technologies dans la formation chirurgicale. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur la chirurgie maxillofaciale, qui est l'une des spécialités chirurgicales les plus récentes et qui doit donc être en phase avec les dernières avancées scientifiques. Cet article explore l'impact de l'exposition aux nouvelles technologies sur les étudiants en médecine et plus particulièrement sur les étudiants en chirurgie. Il compare cette exposition aux méthodes d'éducation plus traditionnelles sur plusieurs points : les durées opératoires, les complications per et post-opératoires, la satisfaction des étudiants et le niveau de connaissance théorique obtenu.

2. Matériel et méthodes

Une recherche complète et structurée des articles publiés a été conduite, et conçue par les auteurs P.G. et R.N. Nous avons suivi les lignes directrices PRISMA pour l'écriture et la lecture des revues systématiques et des méta-analyses. Néanmoins, toutes les lignes directrices PRISMA ne pouvaient être respectées car elles ne s'appliquent pas à ce type de revue de la littérature.

2.1 Inscription

Cette revue est enregistrée sur PROSPERO (CRD42020181376).

2.2 Critères d'admissibilité, sélection et analyse des études

Nous nous sommes intéressés aux étudiants en médecine, plus particulièrement aux étudiants en chirurgie et nous avons observé l'impact des nouvelles technologies sur leurs connaissances et leurs capacités chirurgicales par rapport aux méthodes d'enseignement conventionnelles. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur les temps opératoires, le taux de complication, les questionnaires de satisfaction, les tests de connaissances théoriques ainsi que l'impact sur les courbes d'apprentissage. Nous n'avons inclus que des articles en anglais, dont nous pouvions avoir la version intégrale. Tous les formats d'article étaient admissibles et il n'y avait aucune limite à la date de publication. La stratégie de recherche était d'examiner tous les articles qui traitent des nouvelles technologies dans l'éducation et la chirurgie. Tous ceux qui ne répondaient pas à ces trois critères ont été exclus du recueil. Comme nous voulions nous concentrer davantage sur la chirurgie maxillo-faciale, nous avons isolé les articles concernés afin de les traiter avec une attention particulière.

2.3 Sources de données

Une recherche bibliographique a été effectuée à l'aide de la base de données électronique PubMed. Au total, nous avons effectué six revues de littérature successives pour chaque nouvelle technologie, à savoir l'open field camera, la télémédecine, l'impression 3D, les réseaux sociaux, les serious games et la réalité virtuelle. Les mots clés utilisés ont été choisis grâce à des articles références pour créer une stratégie de recherche générale telle que décrite dans le tableau 1. Nous avons étudié tous les articles. Une première sélection a été faite après lecture des titres, puis une deuxième sélection après lecture des résumés et la sélection finale après lecture des textes complets. L'inclusion s'est terminée le 20 novembre 2020.

TABLEAU 1. Stratégie de recherche documentaire. Les champs de recherche 1, 2 et 4 ont été combinés en utilisant le terme AND. Puis, une nouvelle recherche avec les champs 1, 3 et 4 a été lancée. Ce processus a été mené pour chaque catégorie.

1 = "Training" OR "Education" OR "Teaching" OR "Assessment" OR "Skills" OR "Abilities"

2 = "Surgery"

3 = "Oral Surgery" OR "Craniofacial Surgery" OR "Maxillofacial Surgery"

Open Field Camera

4 = "Open Field Camera"

Telemedicine

4 = "Telementoring" OR "Teleproctoring" OR "Telemedicine" OR "Ehealth" OR "Telehealth"

Social Networks

4 = "Massive Open Online Courses" OR "Social Networks" OR "Smartphone" OR "Facebook" OR "Twitter" OR "What's App" OR "YouTube"

Serious Game

4 = "Serious Game" OR "Game Based Training" OR "Mobile Apps"

Virtual Reality

4 = "Immersive Virtual Reality"

3D printing

4 = "3D printing" OR "Three-Dimensional Printing" OR "3D Printed" OR "Additive Manufacturing"

2.4 Articles sélectionnés

La sélection principale a été faite par un premier investigateur et a été analysée par un deuxième investigateur qui a été en mesure d'ajouter ou de supprimer certains articles. Ensuite, une synthèse de chaque article a été effectuée afin de rédiger le rapport final qui a été contrôlé et corrigé par un deuxième rédacteur.

Nous avons identifié 4713 articles, qui ont été réduits à 228 après lecture des titres et résumés. Après examen des textes intégraux, 83 articles ont été exclus, laissant 145 articles pour l'inclusion finale, dont 45 articles sur la chirurgie maxillofaciale. Chaque diagramme de flux est placé au début de chaque section.

2.5 Biais

Afin d'éviter les biais de sélection, nous avons effectué une revue exhaustive de la littérature. Cette revue de la littérature est enregistrée sur PROSPERO afin d'éviter un éventuel biais d'enquêteur en s'assurant une fidélité optimale au protocole initial. Il est très probable que les études avec de mauvais résultats n'aient pas été publiées, conduisant inévitablement à un biais de publication. Par ailleurs, les populations étudiées ne sont pas toujours identiques et les articles se basent souvent sur de petits effectifs réduisant ainsi le niveau de preuve de l'étude. Nous avons donc pris toutes les précautions nécessaires à l'interprétation de nos résultats.

2.6 Différences avec les lignes directrices PRISMA

Cette étude dépeint la situation technologique dans laquelle nous sommes actuellement. Il n'existe pas de critère de jugement clairement établi qui permettrait de comparer toutes les données. En outre, le format que nous proposons explore six

domaines différents et représente donc l'addition de six revues de la littérature systématiques. Ceci n'est pas prévu dans les lignes directrices PRISMA, mais il nous semblait impossible de faire différemment. Malgré tout, nous avons essayé de rester au plus près des recommandations.

3.Résultats

3.1 Open Field Camera

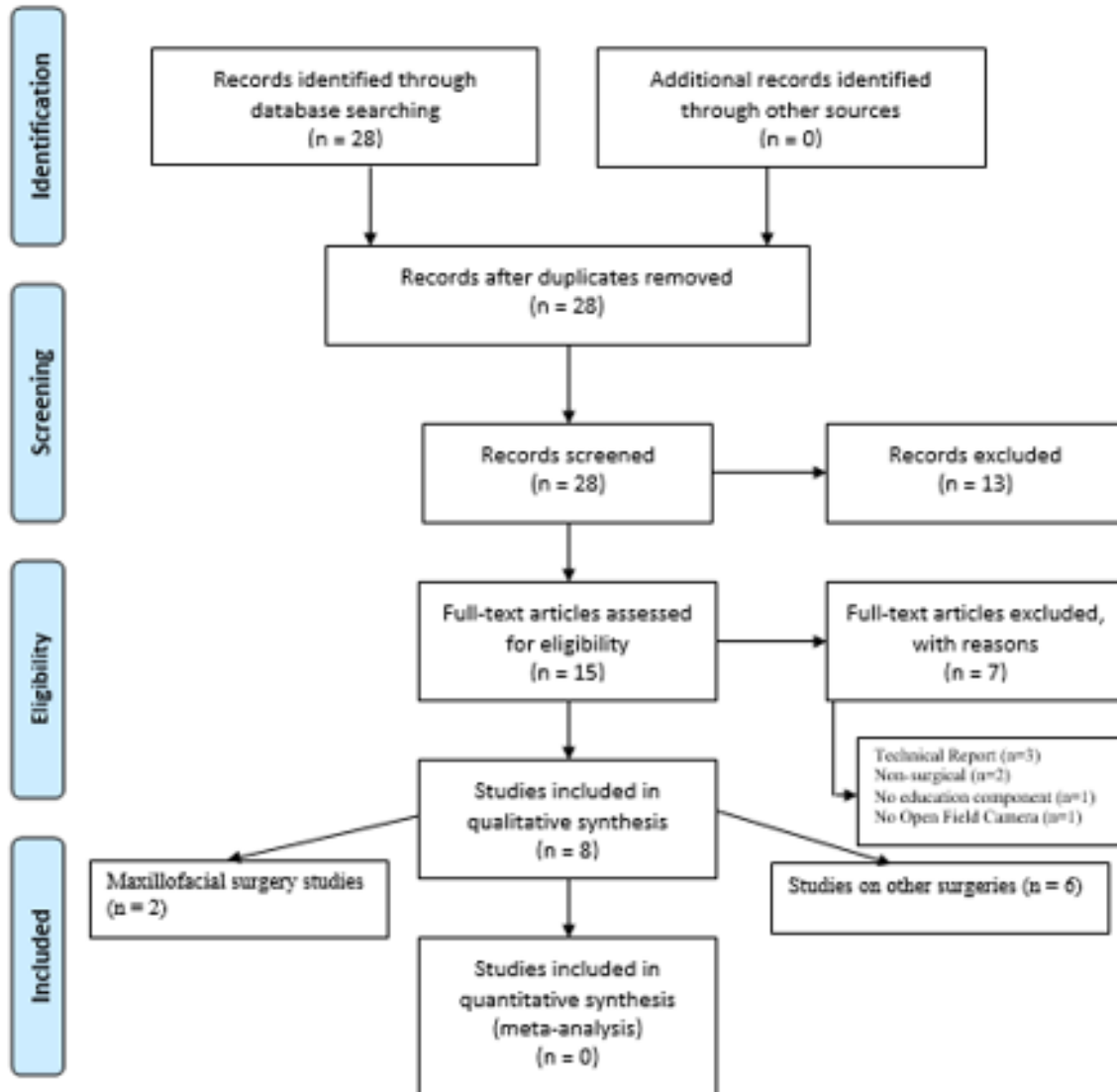


Figure 1. Diagramme de flux PRISMA concernant l'open field camera dans la formation chirurgicale

Quel est le meilleur endroit pour observer une opération ? C'est à cette place que tous les étudiants en chirurgie aimeraient se trouver. Placer une caméra sur le champ opératoire pour partager le déroulement de l'intervention au plus grand nombre semble donc être une très bonne idée.

Des études ont analysé les caméras afin de savoir laquelle offrait la meilleure qualité d'image. Le laparoscope monté via un port alpha et contrôlé par la voix de l'opérateur, semble actuellement offrir la meilleure qualité d'image [6,12,13]. Sur tous les critères comme la clarté de l'image, la visualisation du champ opératoire ou encore la capacité à suivre le déroulement de l'intervention, l'alpha-port/laparoscope s'est révélé supérieur à la sky-cam elle-même supérieure à la head-cam [12]. Ces différences se majorent avec la profondeur du champ opératoire [6]. Le principal problème avec les head-cams est le mouvement de la tête du chirurgien. Pour obtenir la meilleure qualité d'image il est nécessaire d'ancrer la caméra sur un point fixe. La sky-cam, elle, nécessite du personnel pour déplacer la caméra. Placer l'objectif aussi proche que possible du champ opératoire augmente la qualité de l'image et permet au chirurgien d'interagir et d'ajuster la caméra pour l'avoir dans la meilleure position. L'alpha-port/laparoscope a le potentiel d'ouvrir la porte à l'enseignement chirurgical à distance et au telementoring chirurgical partout dans le monde[13]. En plus d'une meilleure qualité d'image, ce dispositif d'enregistrement vidéo diminue la fatigue du chirurgien en lui permettant d'opérer dans une position plus confortable ; en effet, l'opérateur peut également visualiser la vidéo comme le reste du personnel de la salle d'opération (anesthésistes, infirmières, internes et étudiants en médecine) [6].

Le principal problème avec l'alpha-port/laparoscope est son coût. Des solutions moins onéreuses existent, certes au prix d'une qualité d'image inférieure, mais avec une résolution suffisante pour être utilisées dans l'enseignement. Les caméras GoPro et Contour semblent être de bonnes alternatives. Selon Chaves et al., ces méthodes d'enregistrement semblent suffisantes pour les observateurs [14].

Un logiciel est en cours de développement pour déterminer la cinétique du mouvement de certaines tâches techniques lors des interventions chirurgicales. Il permettrait de comparer les performances des chirurgiens. Actuellement, l'évaluation de la réalisation des sutures est la plus sensible[15].

D'autres ont essayé de voir si l'utilisation de trois caméras (devant / en haut / sur le côté) pouvait donner au chirurgien une vue tridimensionnelle de l'intervention, en particulier pour l'aider à percevoir la profondeur du site chirurgical. Même si la plupart du temps la vue supérieure était utilisée, les résultats étaient meilleurs avec ces trois caméras qu'avec une seule. Malheureusement, ce dispositif semble trop encombrant pour être intégré dans un bloc opératoire et nécessite donc un travail de miniaturisation avant d'envisager son utilisation[16].

Bien que la participation chirurgicale active augmente considérablement l'intérêt et l'attention des étudiants pour les interventions, l'open field camera semble être une perspective intéressante. Elle réduit le nombre de personnes dans la salle d'opération, diminuant ainsi le risque d'infection tout en offrant au plus grand nombre la possibilité d'observer. Un large éventail de prix est disponible pour cette technologie et il est certain que son développement ne cessera de croître dans les années à venir.

En chirurgie maxillofaciale, une étude a proposé un système pour enregistrer les interventions chirurgicales à moindre coût. Pour 850 \$, il est possible grâce à une GoPro modifiée® ((GoPro, San Mateo (USA)) d'enregistrer une intervention sans fil pendant 14 heures, laissant ainsi toute liberté de mouvement au chirurgien, la GoPro® étant placée sur son front. La qualité de l'enregistrement était plus qu'acceptable [17]. Une autre initiative à moindre coût propose de fixer au champ opératoire un smartphone avec un angle de vue optimal un peu comme l'alpha-port/laparoscope. La

méthode, certes artisanale, présente cependant l'avantage d'être gratuite car tout le monde possède un smartphone [18]. Ces enregistrements vidéos semblent très intéressants, en particulier pour conserver numériquement des interventions chirurgicales rares, telles que la prise en charge de syndromes malformatifs majeurs. Il serait également intéressant de pouvoir visualiser certaines opérations offrant peu de visibilité aux aides opératoires comme les rhinoplasties par voie fermée ou la chirurgie des articulations temporo-mandibulaires.

TABLEAU 2. Articles concernant l'open field camera dans la formation chirurgicale

Title	Authors	Publication Year	Article Type	Surgical Specialty	Number of subjects
Modified GoPro Hero 6 and 7 for Intraoperative Surgical Recording-Transformation into a Surgeon-Perspective Professional Quality Recording System.	Ganry et al.	2019	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new system
Video-recording using smartphones during surgical procedures in outpatients.	Lin et al.	2019	Open research article	Dental and maxillofacial surgery	Introduce new system
An Innovative Streaming Video System with a Point-of-View Head Camera Transmission of Surgeries to Smartphones and Tablets: An Educational Utility.	Chaves et al.	2017	Open research article	Gynaecological surgery	21 students
A marker-less technique for measuring kinematics in the operating room	Frasier et al.	2016	Open research article	Digestive surgery and Thoracic surgery	16 cases
Laparoscopic Telescope with Alpha Port and Aesop to View Open Surgical Procedures	Russell et al.	2001	Open research article	Digestive Surgery	4 doctors

Investigation of gaze patterns in multi view laparoscopic surgery	Kottayil et al.	2016	Open research article	Non-human experience	20 students
A Novel Telemedicine Method for Viewing the Open Surgical Field	Broderick et al.	2002	Open Research article	Non-human experience	11 attendees
Evaluation of Operative Imaging Techniques in Surgical Education.	Kothari et al.	2004	Open research article	ENT	14 students

3.2 Télémédecine

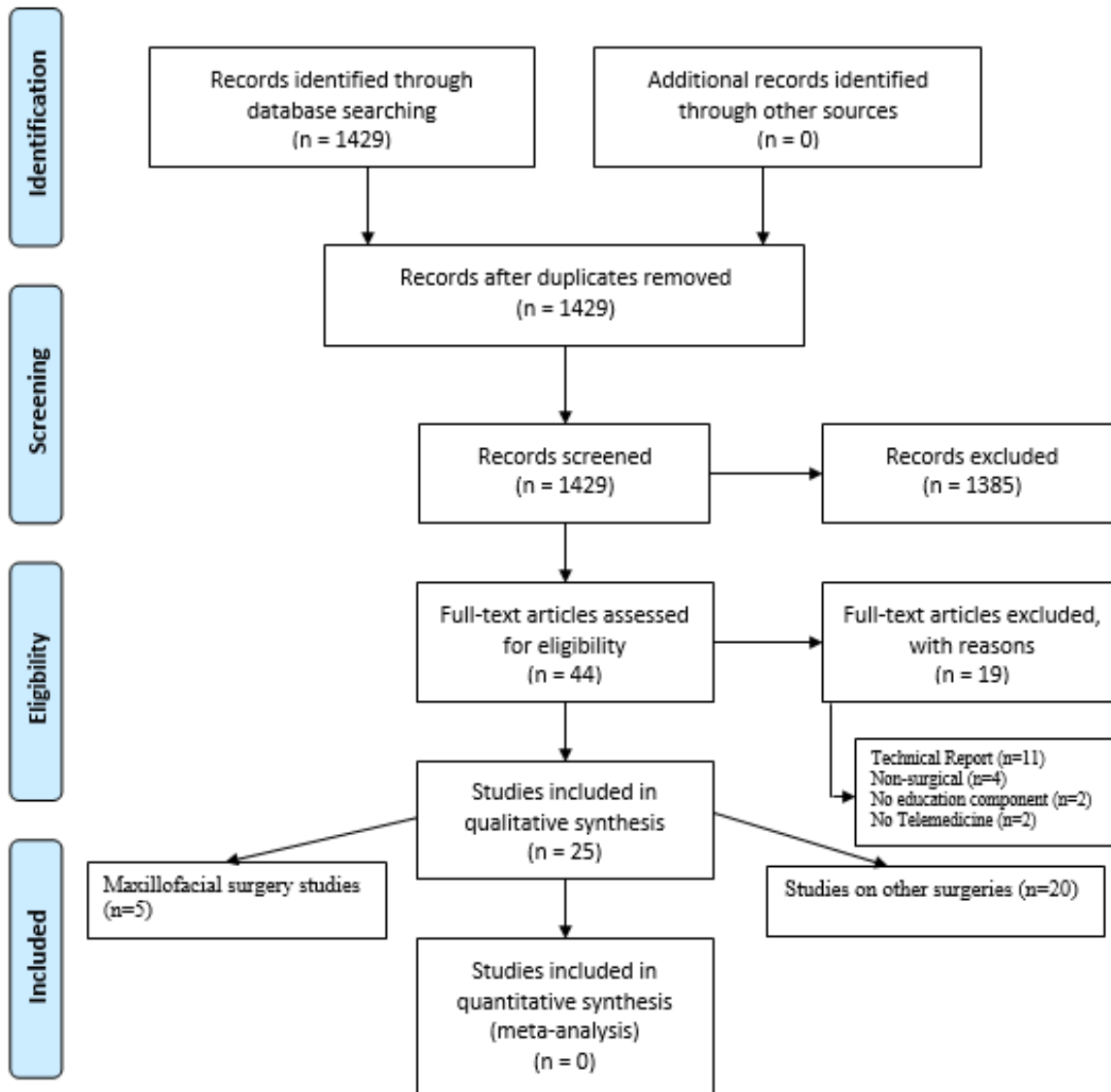


Figure 2. Diagramme de flux PRISMA concernant la télémédecine dans la formation chirurgicale

La télémédecine, pratique tendance, est en pleine croissance. Elle consiste à transmettre des informations médicales par voie numérique. Elle comprend la téléchirurgie, la téléconsultation, le télédiagnostic, la téléproctorisation, la téléprésence et d'autres encore. En ce qui concerne l'enseignement chirurgical, le télémentoring semble être l'application la plus intéressante de la télémédecine.

Le télémentoring est une relation, facilitée par la technologie des télécommunications, dans laquelle un expert fournit des conseils à un apprenant moins expérimenté situé dans un autre endroit [19–22]. À une époque où les besoins des chirurgiens augmentent, le télémentoring semble être l'une des solutions pour augmenter le volume d'enseignement chirurgical. Il peut aider à apporter de nouvelles compétences dans les zones rurales ou simplement permettre de développer des techniques chirurgicales complexes sur l'ensemble du territoire [19,23–26].

L'accès le plus facile au télémentoring reste Skype® (Microsoft Skype Division, Palo Alto, USA) [23,27]. Malheureusement, cette interface n'est pas suffisamment sécurisée pour le partage d'information médicale et ne peut être utilisée de manière durable. D'autres plateformes plus sûres existent. Le télémentoring est comme une voiture, de nombreuses options peuvent être ajoutées comme la téléstration et les pointeurs laser. Cette technologie permet de réduire jusqu'à 30 % les temps opératoires [21]. Les interventions les plus fréquentes du mentor consistent à faciliter l'identification des différents éléments d'anatomie, à indiquer si l'étendue d'exposition ou de résection est suffisante et pour aider sur des questions techniques [21,28–30].

Le peu d'études qui existent sur l'efficacité du télémentoring a montré qu'il n'y a pas de différence significative sur la durée opératoire et les complications postopératoires entre de jeunes chirurgiens supervisés par télémentoring et des chirurgiens expérimentés opérant seuls [23]. Il n'y avait pas non plus de différence significative sur ces mêmes critères entre un chirurgien supervisé sur place et un autre supervisé par télémentoring. [19,21,29,31,32]. Néanmoins, le télémentoring présente quelques limites. Le problème le plus fréquemment rencontré est la difficulté à indiquer le bon plan de dissection [32]. En outre, le respect des règles des autorités sanitaires,

qui diffèrent la plupart du temps d'un pays à l'autre, semble être un obstacle à la diffusion du télémentoring [32]. Le télémentoring peut enfin être une source de mauvaise communication ; le fait que le mentor ne soit pas physiquement présent dans la salle d'opération peut remettre en cause le leadership traditionnel du chirurgien [21].

Après revue de la littérature, nous pouvons proposer les points essentiels du télémentoring idéal :

- Techniquement :

- Une résolution vidéo de 768x492 et plus semble être le minimum pour pouvoir discerner les différentes structures anatomiques [20,23].
- L'utilisation d'un réseau sécurisé est essentielle [33].
- Un niveau élevé de cryptage est nécessaire pour la protection de l'information médicale tel le 256-bit Advanced Encryption Standard (AES) [20,32].
- La bande passante minimale pour le télémentoring devrait être d'environ 40Mbit/s [20,32].
- La téléstration et l'annotation sont des outils utiles et essentiels pour l'éducation chirurgicale [20,34].
- Le système de télémentoring doit être portable et abordable [20,34].

- Organisation :

- Une formation initiale sur place avec le mentor permettrait aux jeunes chirurgiens d'avoir une solide connaissance de l'intervention [28,35].
- Le mentor et le jeune chirurgien doivent se rencontrer avant l'intervention, se familiariser et avoir une idée du plan opératoire [28,31,34,36,37].
- La communication et l'explication à toute l'équipe impliquée dans l'intervention chirurgicale sont l'une des clefs du succès [24,25,28].
- Les débriefings après la séance de télémentoring sont essentiels à la bonne progression personnelle du mentor et du jeune chirurgien [21,28].
- Le télémentoring doit être en accord avec les autorités gouvernementales du pays où l'intervention est pratiquée [20].

- Compétences:

- Le chirurgien qui va être supervisé doit avoir les compétences nécessaires pour terminer l'intervention seul si le télémentoring venait à ne pas fonctionner [21,22,28,31–34].
- Un cours de formation en pédagogie du télémentoring est une condition préalable qui pourrait être très intéressante pour le mentor [21,34].
- Le mentor doit être reconnu comme un expert et doit justifier un certain nombre d'opérations effectuées à l'avance.

Un autre point important est de savoir qui finance cette technologie avec un prix pouvant varier entre 50 et 85 000 \$ et 15 000 \$ d'entretien [23,27,33,35]. Dans l'avenir, on peut espérer qu'en se développant cette technologie baisse également en terme de coût pour qu'elle puisse se démocratiser au plus grand nombre [22].

Outre la formation, le télémentoring trouve d'autres applications, en particulier dans certaines situations extrêmes où l'urgence de la situation nécessite une intervention immédiate mais qu'aucun chirurgien n'est sur place [38]. En effet, des expériences sur simulateurs ont permis de montrer qu'il était possible de guider des médecins non chirurgiens pour réaliser des fasciotomies de décharge.

En chirurgie orale et maxillofaciale, cette technologie reste malheureusement encore peu utilisée. Peut-être que le peu d'opérations nécessitant des moyens endoscopiques explique ce manque d'utilisation (la majorité des études de télémentoring sont réalisées sur chirurgie endoscopique). Certains articles décrivent l'utilisation de la télémédecine comme alternative à la visite postopératoire lorsque l'opérateur ne peut être sur place. [36] Toutefois, le tour au lit des patients ne doit quand même pas être supprimé totalement [39]. Une expérience intéressante a utilisé la télémédecine comme moyen de développer les échanges internationaux sans frais de transport. À l'aide de Skype, la réalisation d'un lambeau libre ostéo-cutané de fibula pour une reconstruction mandibulaire a été retransmise entre le Mexique et les États-Unis. Les étudiants pouvaient interagir avec les chirurgiens en temps réel. Les retours furent très positifs [40]. Plus récemment, avec la pandémie de la COVID 19, les étudiants ne pouvant plus aller dans les blocs opératoires, une équipe a développé un système de communication audiovisuelle à double sens, permettant une interaction

directe entre les étudiants et les opérateurs [41]. Mitsuno et al. ont développé un système de télémentoring en chirurgie craniofaciale avec HoloLens® (Microsoft, Redmond, Etats-Unis) et Skype®. Ce dispositif à faible coût semble facile à utiliser bien que le manque de sécurité de cryptage de Skype® doit être pris en considération [42]. Dans l'ensemble, compte tenu de ces quelques études encourageantes, tout le monde s'accorde pour dire que la chirurgie orale et maxillofaciale doit continuer à s'ouvrir à la télémédecine que ce soit dans la formation ou bien dans la pratique quotidienne [43]. Bien que cette technologie semble pleine de promesses, il persiste un manque d'essais contrôlés randomisés pour faire de cet outil de demain un outil d'aujourd'hui [21].

TABLEAU 3. Articles concernant la télémédecine dans la formation chirurgicale

Title	Authors	Publication Year	Article Type	Surgical Specialty	Number of subjects
Creation of an Interactive Virtual Surgical Rotation for Undergraduate Medical Education During the COVID-19 Pandemic	Chao et al.	2020	Open research article	ENT	Introduce new system
Virtual rounding via videoconference-enabled smartphones: a case for multifacility rounds	Kaltman et al.	2012	Case report	Maxillofacial surgery and ENT	3 cases
Telementoring Demonstration in Craniofacial Surgery With HoloLens, Skype, and Three-Layer Facial Models	Mitsuno et al.	2020	Open research article	Craniofacial surgery	Introduce new system
Telemedicine and Surgical Education Across Borders: A Case Report.	Gosman et al.	2009	Case report	Craniofacial surgery	1 case
Teledentistry: a systematic review of the literature.	Mariño et al.	2013	A review	Oral surgery	59 articles

The Impact of Telementoring.	Andreassen et al.	2018	Open research article	Digestive surgery	8 surgeries
Assessing the impact of telestration on surgical telementoring: A randomized controlled trial.	Budrionis et al.	2016	Randomized control trial	Digestive surgery	8 attendees
Wearable Technology for Global Surgical Teleproctoring.	Datta et al.	2015	Open research article	Digestive Surgery	10 patients
Telementoring: The Surgical Tool of the Future.	Ponsky et al.	2014	A review	Digestive and vascular surgeries	33 articles
Telementoring systems in the operating room: a new approach in medical training.	Wachs et al.	2013	Open research article	Digestive surgery	1 surgery
A comprehensive review of telementoring applications in laparoscopic general surgery.	Antoniou et al.	2012	A review	Digestive surgery	10 studies
Telerounding & telementoring for urological procedures.	Sen et al.	2016	Open research article	Urological surgery	10 patients
The “tele” factor in surgery today and tomorrow: implications for surgical training and education.	Gambadauro et al.	2013	A review	Urological and digestive surgeries	66 articles
A pilot study of surgical telementoring for leg fasciotomy.	Talbot et al.	2018	A pilot study	Orthopaedic surgery	4 surgeries
Live transference of surgical subspecialty skills using telerobotic proctoring to remote general surgeons.	Ereso et al.	2009	Open research article	Heart, Neuro and Orthopaedic surgeries	8 surgeons
Surgical telementoring: A new model for surgical training.	Snyderman et al.	2016	Prospective study	Neurosurgery	10 surgeries
Trans-Atlantic Telementoring with Pediatric Surgeons: Technical Considerations and Lessons Learned.	Bruns et al.	2016	Case report	Paediatric surgery	2 cases

Telementoring of Surgeons: A Systematic Review.	Erridge et al.	2019	A review	Surgery	66 studies
White paper: technology for surgical telementoring—SAGES Project 6 Technology Working Group.	Bogen et al.	2019	Working Group	Surgery	Expert meeting
Effectiveness of Telementoring in Surgery Compared with On-site Mentoring: A Systematic Review.	Bilgic et al.	2017	A review	Surgery	11 studies
Educational implications for surgical telementoring: a current review with recommendations for future practice, policy, and research.	Augestad et al.	2017	A review	Surgery	Expert opinion
The evolution of surgical telementoring: current applications and future directions	El-Sabawi et al.	2016	A review	Surgery	37 articles
Video Telementoring to Accelerate Learning of New Surgical Techniques.	Julien et al.	2016	A review	Surgery	7 articles
Project 6 Summit: SAGES telementoring initiative.	Schlachta et al.	2016	Working Group	Surgery	60 attendees
Technology for teaching: New tools for 21st century surgeons.	Eskander et al.	2016	A review	Surgery	39 articles

3.3 Impression 3D

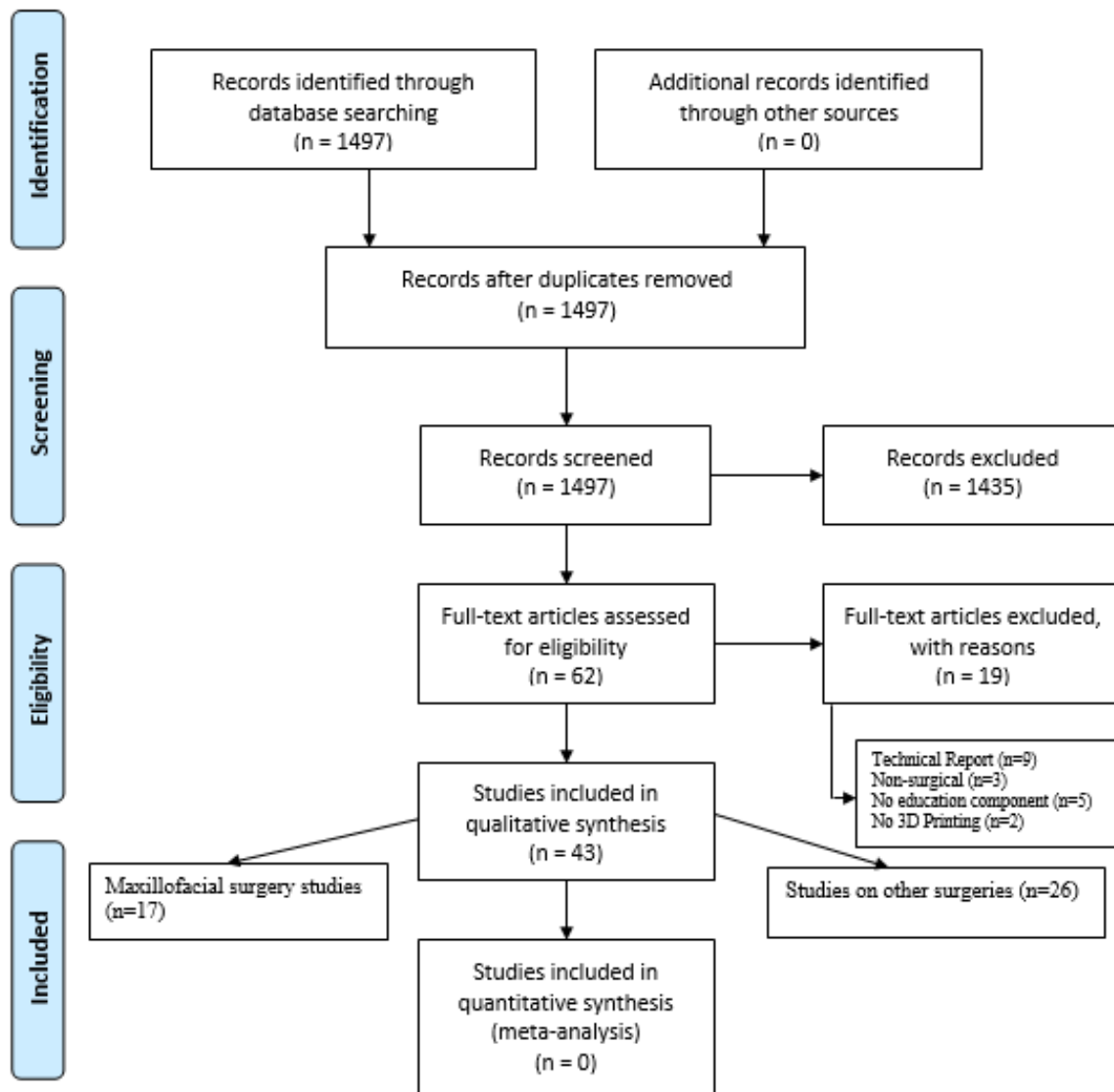


Figure 3. Diagramme de flux PRISMA concernant l'impression 3D dans la formation chirurgicale

La méthode de formation actuelle consiste à aider pendant les interventions puis à y prendre part, étape par étape, suivant l'adage traditionnel « Voir une fois, Faire une fois, Enseigner une fois » [44,45]. La position de l'étudiant ne lui permet pas toujours d'avoir une bonne vision de l'intervention, et inversement, il peut être difficile pour le chirurgien expérimenté de visualiser toutes les actions de son interne lorsqu'il lui confie des tâches [44,46]. Avec les procédures d'une complexité croissante, les

approches mini-invasives, les ressources pédagogiques limitées, les restrictions sur les heures de travail, l'accroissement des connaissances médicales et l'augmentation des exigences en matière de service, il est nécessaire de proposer une formation adaptée, basée sur la répétition et s'approchant au plus près de la réalité [47,48]. L'étudiant doit pouvoir se former en autonomie [49,50].

Les cadavres sont utilisés comme outils d'entraînement depuis des années. Malheureusement, ils ne permettent pas de reproduire toute la diversité des pathologies, leur coût est important et les restrictions médicales et éthiques sont autant d'entrave à une formation optimale [45,50–58]. Certaines pathologies sont rares ou ne peuvent pas être suffisamment préservées au moment de la prosection [56,59–62]. La raideur tissulaire causée par le processus de fixation procure des sensations irréalistes des tissus mous [44]. Les modèles cadavériques animaux sont certainement plus abordables, mais ils présentent également des problèmes éthiques et surtout l'anatomie animale est parfois très éloignée de l'anatomie humaine [44,48,52,53,58,63]. Certaines entreprises proposent des modèles 3D industriels généralement très bien faits mais qui, en plus de leur prix élevé, ont l'inconvénient d'offrir un panel de maladie plutôt restreint [44,51,53,56].

Ces dernières années, une nouvelle solution est apparue, l'impression tridimensionnelle, également connue sous les noms anglais de « rapid prototyping », « additive manufacturing » ou encore « solid free-form technology ». C'est un processus qui consiste à produire une entité 3D à partir d'une série d'images bidimensionnelles [54,56,60,64–67]. Le principe est de fusionner ou de déposer des matériaux en couche pour créer un objet 3D [54,62]. Le développement est récent ; les premières applications datent des années 1980 avec Charles Hull [54,68]. Dans le domaine

médical, il est possible d'utiliser les données provenant de scanners ou d'IRMs pour recréer des modèles 3D [54,60,66,69]. Tous les logiciels qui permettent de transformer ces images radiologiques en images numériques 3D peuvent être trouvés en ligne gratuitement, ils sont faciles à utiliser et intuitifs. Plusieurs tutoriels en ligne donnent des instructions précises. Les principaux logiciels sont OsiriX® (Pixmeo, Genève, Suisse), Meshlab® (Istituto di Scienza e Tecnologia dell'informazione, Roma, Italia) Netfabb® (Autodesk, San Rafael, Usa) et Blender® (Blender Foundation, Amsterdam, Pays-Bas) [70]. Aucune formation spéciale et aucune connaissance préalable spécifique n'est requise [47,71]. La résolution des imprimantes permet de produire des objets de 89 microns, ce qui signifie que toute structure humaine observée au microscope ou à l'endoscope peut être recréée numériquement, puis imprimée à l'aide d'appareils spécifiques [55].

Cette nouvelle technologie peut changer la façon de former les internes, en particulier pour les interventions délicates [64,71]. Il s'agit d'une aide pédagogique importante qui peut intervenir à tous les niveaux de la formation médicale et chirurgicale [45,55,56,59]. Elle offre un environnement d'apprentissage sûr et sans pression, contrairement au bloc opératoire, et a la capacité d'exposer l'étudiant à des problèmes de différents niveaux afin d'améliorer ses compétences techniques et cognitives [46,49,52,53,55–57,60,64,72]. Cette technologie permet de produire des modèles réalistes d'une extrême précision anatomique [45,60,61,72,73]. Elle permet d'améliorer la perception 3D en offrant la possibilité d'interagir physiquement avec l'anatomie [54,56,61,65,66,72,74]. Les étudiants comprennent mieux les interventions chirurgicales, et ont une meilleure idée de la taille et de la localisation des problèmes par rapport aux autres modalités d'imagerie en deux dimensions [48,54,56,61,65,66,69,72,74]. L'expérience chirurgicale du participant est inversement

proportionnel au bénéfice qu'il peut retirer en s'entraînant sur un modèle imprimé en 3D [74]. Une revue systématique de 17 articles a montré des progrès immédiats et solides dans le temps parmi la population de médecins étudiée [25]. Dans certaines études, ces simulations sur objet 3D ont mis en évidence une amélioration du rendement et des compétences des étudiants dans les procédures chirurgicales sur le long terme [52,55]. La confiance en soi d'un point de vue chirurgical est également considérablement accrue chez les internes [66,73,75,76]. L'impression 3D permet de se familiariser avec le pathologique ; elle pourrait remplacer les séances de dissection et sonner le glas des salles d'anatomie [66,68,77]. Certaines pathologies varient beaucoup en termes d'anatomie d'un individu à l'autre. L'impression 3D a l'avantage de pouvoir refléter cette diversité [76,77]. Les sensations tactiles procurées par les modèles 3D se sont avérées très réalistes, en particulier pour l'os [49]. Il devient ainsi possible d'obtenir une première expérience chirurgicale avant de s'exercer au bloc opératoire [55]. La morbidité s'en trouve donc diminuée car les internes ont déjà pu développer les compétences nécessaires pour affronter les difficultés de certaines interventions [60,61].

Alrasheed et al. et Barber et al. ont développé l'utilisation de l'endoscopie sur les modèles 3D pour s'exercer dans le domaine de la chirurgie endo-sinusienne [49,57]. Ces études ont combiné l'impression 3D avec la réalité virtuelle avec des résultats très encourageants, en particulier en termes de navigation. La prochaine étape est d'offrir la possibilité d'opérer virtuellement. D'autres simulateurs ont été créés, pour la chirurgie endoscopique trans-canaulaire de l'oreille, la cholédoscopie, les procédures bronchoscopiques, l'otosclérose, l'anatomie rétropéritonéale, le clippage d'anévrisme, la chirurgie de la microtie, la chirurgie des maladies cardiaques congénitales et beaucoup d'autres [45,50,55,60,72,74,76–78]...

Le coût de l'impression 3D est en constante diminution et des imprimantes 3D bon marché sont maintenant disponibles [25,46,47,51,55,56,64,65,68,71,74,75,79]. Les imprimantes à bas prix se situent entre 750 et 1250 \$ [61,68,75]. La conception initiale d'une nouvelle région anatomique coûte environ 5000 \$ et la production d'un modèle d'entraînement environ 200 \$. La plupart du temps, ces simulateurs peuvent être réutilisés directement ou bien seule une petite partie du modèle est à remplacer [44,56]. De la recherche et du développement sont encore nécessaires pour démocratiser cette technologie [49,50,64]. Des études à plus grande échelle et des essais contrôlés randomisés demeurent essentiels pour démontrer la validité scientifique de cette méthode [46,60,66,72,74,75]. L'évaluation de l'efficacité de ces modèles dans l'éducation constitue la prochaine étape [71,80]. Il sera également important d'évaluer le maintien à long terme des compétences acquises [72].

L'insertion des vaisseaux sanguins devrait se développer de plus en plus pour créer les modèles 3D de prochaine génération, ce qui permettra de simuler le flux artériel et ainsi d'offrir une meilleure expérience aux internes et assistants. [45,65,73]. Par exemple, un modèle d'entraînement à la gestion de l'épistaxis a été créé où les étudiants pouvaient s'exercer à identifier et à traiter les sources de saignement endonasal [59]. En neurochirurgie, un simulateur d'anévrisme cérébral permet de s'exercer à la mise en place de clips avec la simulation d'un flux sanguin [50]. L'association des tissus durs avec les tissus mous est une chose qui reste encore difficilement réalisable [44,54]. En effet, le plus difficile est de trouver la bonne consistance pour les tissus mous. De nombreux projets s'intéressent de près à cette problématique [49,55,69,72]. Des imprimantes 3D qui peuvent utiliser simultanément plusieurs matériaux existent, avec des résultats très intéressants, mais, le coût très élevé reste un facteur majeur limitant leur utilisation [54].

Les principaux matériaux utilisés pour l'impression 3D sont :

- PLA ou Acide polylactique : Il constitue le meilleur choix pour la plupart des modèles de simulation car il est biodégradable, non toxique et a une consistance similaire à l'os. Toutefois, en raison de son point de fusion très bas, il est nécessaire d'irriguer en continu le matériel de forage lors des manipulations pour ne pas risquer la fonte du matériau [71].
- ABS ou Acrylonitrile Butadiène Styrène : Il est plus facile à manipuler car son point de fusion est plus élevé et il est plus facile à couper. Il pourrait être le matériau de choix pour les modèles sur lesquels des instruments de forage sont utilisés sans irrigation sur des durées importantes. [71]. Il permet également de reproduire les vaisseaux qui pourraient recevoir des clips lors des simulations [50].
- Silicone : Idéal pour la simulation des tissus mous. Il est possible de modifier la viscosité du silicone pour obtenir différentes consistances [71]. Idéal pour simuler le cartilage costal, [60] il permet également de simuler les tissus cérébraux. Il est cinq fois moins dense que l'ABS [73].
- Polyamide: Excellent matériau pour simuler l'os immature du crâne des nourrissons. Il autorise la réalisation d'ostéotomies en offrant de bonnes sensations tactiles aux chirurgiens [53].
- Résine acrylique: Elle semble être une bonne alternative pour les tissus durs [64].
- Phosphate de calcium : Excellent matériau pour simuler les dents, il autorise toutes sortes de manipulations [81].

Cette technologie reçoit un bel accueil de la part des étudiants et son importance dans les programmes d'éducation institutionnels devrait croître de plus en plus dans le futur [48,55,66,72,74,76,77]. L'enthousiasme est au rendez-vous pour cette nouvelle méthode d'apprentissage. Elle permet de réduire les durées opératoires et ainsi de diminuer la pression liée aux contraintes de temps au bloc opératoire pour les jeunes chirurgiens. C'est une solution accessible et peu coûteuse [66,69,73,74]. Les différentes institutions pourraient partager leurs images numériques en ligne, ce qui représenterait une fantastique opportunité pour l'ensemble de la communauté scientifique [47,71].



Figure 4. Modèles imprimés 3D utilisés dans l'éducation à la craniosynostose : un exemple d'utilisation de l'impression 3D dans l'éducation cranio-maxillo-faciale

La perception spatiale est l'une des compétences les plus utiles au chirurgien oral. L'impression 3D qui peut simuler la complexité anatomique de l'os, des tissus mous et des dents pourrait donc être un bel atout pour cette discipline chirurgicale [68,80]. Dans les facultés dentaires, les séances pratiques sont essentiellement réalisées sur des dents humaines avulsées. La sélection chronophage de ces dents, les considérations éthiques, les risques d'infection croisée et leur anatomie qui n'est pas toujours en phase avec les modèles recherchés représentent autant d'inconvénients à leur utilisation [47]. Les dents artificielles industrielles sont intéressantes mais elles ont un coût élevé (environ 1000 \$ par modèle), la variété est peu importante et les délais de livraison peuvent être très longs [47,71]. Ces modèles industriels sont largement utilisés mais n'offrent qu'une petite gamme en matière de pathologies et de spécificités individuelles [67]. Désormais, l'impression 3D permet de créer des dents. Elles possèdent une bonne radio-opacité et l'éventail de choix ne souffre d'aucune limite. La résine est moins dure que la dentine [47]. C'est pourquoi, les projets futurs devront s'atteler à chercher la résine aux propriétés physiques les plus semblables à celles de la dentine en termes de dureté et de radio-opacité [47].

La chirurgie crânio-faciale qui nécessite une approche multidisciplinaire possède également son simulateur 3D [53]. Cette chirurgie requiert une familiarité avec l'anatomie complexe que représente l'architecture du crâne [51]. Les modèles 3D en polyamide peuvent fournir une reproduction précise de l'anatomie osseuse et des différentes pathologies [53]. C'est une occasion unique pour les chirurgiens de développer une perception 3D de l'anatomie normale et pathologique de la base du crâne et du crâne [53,82]. Ce simulateur offre la possibilité de s'exercer et de déterminer la force idéale nécessaire pour plier l'os sans le casser [53]. Le jeune chirurgien crâniofacial améliore ainsi de façon objective ses connaissances techniques

en apprenant à développer un plan opératoire étape par étape, et ce de façon plus précise et plus rapide [51]. Ce modèle s'élève à environ 100 \$. Son principal inconvénient est que les tissus mous ne sont pas intégrés [53]. Un autre simulateur a été conçu avec les tissus mous pour s'exercer à la correction des trigonocéphalies. Il permet une approche chirurgicale étape par étape avec les outils du bloc opératoire, il est alors possible d'inciser la peau, de disséquer dans le bon plan et d'effectuer les ostéotomies, le tout avec une perception tactile adéquate [83].

Bertin et al. ont développé un nouveau modèle d'entraînement 3D pour s'exercer à l'ostéotomie sagittale des branches montantes dans le cadre des malocclusions de classe II. Les étudiants estimaient que leurs compétences chirurgicales s'amélioraient avec une augmentation significative des scores d'auto-évaluation [63]. La chirurgie orbitaire est complexe et très exigeante ; s'exercer est fondamental [44]. Un nouveau type de simulateur 3D permet de reproduire une fracture isolée du plancher de l'orbite de manière réaliste grâce à des données anatomiques pertinentes. Les étudiants étaient généralement satisfaits des caractéristiques de ce système et estimaient que cette méthode leur permettait de progresser rapidement. Malheureusement, les tissus mous ne sont pas non plus représentés [44]. La rhinoplastie a également son modèle 3D en silicone [64]. L'acrylonitrile butadiène styrène est utilisé pour la charpente osseuse et différentes consistances de silicone permettent de reproduire le cartilage, la peau et la muqueuse. Ce simulateur a permis aux élèves d'accroître leurs capacités de manière significative [60]. Un autre simulateur de fente labiale en silicone permet de se former à la chéiloplastie. Lors de son évaluation, les étudiants trouvaient ce modèle très réaliste et il permet de s'exercer sur différents types de fentes [84]. Il est également possible de se former à l'extraction des dents de sagesse incluses grâce à l'impression 3D. Cela a un effet positif sur la capacité clinique à planifier et à pratiquer

les différentes étapes de l'intervention. Cette formation pourrait compenser les lacunes et améliorer les performances des étudiants, en particulier pour ceux qui présentent des difficultés à se représenter les éléments dans l'espace [58,80]. D'autres dispositifs existent pour se former à la résection apicale [67] ou encore à l'extraction chirurgicale des dents surnuméraires [85].

L'impression 3D trouve déjà de nombreuses applications en chirurgie orale et maxillofaciale. Cette spécialité semble en effet particulièrement adaptée à cette nouvelle technologie notamment de par sa relation étroite avec l'os. L'impression 3D devrait donc être tout naturellement l'une des voies d'avenir pour cette chirurgie.

TABLEAU 4. Articles concernant l'impression 3D dans la formation chirurgicale

Title	Authors	Publication Year	Article Type	Surgical Specialty	Number of subjects
Bilateral sagittal split osteotomy training on mandibular 3-dimensional printed models for maxillofacial surgical residents.	Bertin et al.	2020	Open research article	Maxillofacial surgery	22 students
3D printed bone models in oral and cranio-maxillofacial surgery: a systematic review	Meglioli et al.	2020	A review	Maxillofacial surgery	64 articles
3D-printed patient individualised models vs cadaveric models in an undergraduate oral and maxillofacial surgery curriculum: Comparison of student's perceptions	Seifert et al.	2020	Open research article	Maxillofacial surgery	34 students
Use of 3D printed models in student education of craniofacial traumas.	Nicot et al.	2019	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new method

3D Printed Surgical Simulation Models as educational tool by maxillofacial surgeons.	Werz et al.	2018	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new model
3D-Printed Craniosynostosis Model: New Simulation Surgical Tool.	Ghizoni et al.	2018	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new models
Study of medical education in 3D surgical modeling by surgeons with free open-source software: Example of mandibular reconstruction with fibula free flap and creation of its surgical guides.	Ganry et al.	2018	Open research article	Maxillofacial surgery	22 surgeons
Haptic, Physical, and Web-Based Simulators: Are They Underused in Maxillofacial Surgery Training?	Maliha et al.	2018	A review	Maxillofacial surgery	17 articles
3D-Printed Simulation Device for Orbital Surgery.	Lichtenstein et al.	2017	Open research article	Maxillofacial surgery	10 surgeons
CAD/CAM silicone simulator for teaching cheiloplasty: description of the technique.	Zheng et al.	2015	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new model
Augmented reality and physical hybrid model simulation for preoperative planning of metopic craniosynostosis surgery	Coelho et al.	2020	Open research article	Craniofacial surgery	38 senior surgeons
Modeling Medical Education: The Impact of Three-Dimensional Printed Models on Medical Student Education in Plastic Surgery	Lane et al.	2020	Randomized control trial	Craniofacial surgery	44 students
The Use of Patient-Specific Three-Dimensional Printed Surgical Models Enhances Plastic Surgery Resident Education in Craniofacial Surgery.	Lobb et al.	2019	Open research article	Craniofacial surgery	Introduce new model

Validation of a three-dimensional printed model for training of surgical extraction of supernumerary teeth	Chae et al.	2020	Open research article	Oral surgery	30 students
Measuring the impact of simulation practice on the spatial representation ability of dentists by means of Impacted Mandibular Third Molar (IMTM) Surgery on 3D printed models.	Yao et al.	2019	Open research article	Oral surgery	21 students
3D-printed Surgical Training Model Based on Real Patient Situations for Dental Education	Hanisch et al.	2020	Randomized Control trial	Dental surgery	68 students
3D printed replicas for endodontic education	Reymus et al.	2019	Open research article	Dental surgery	105 students
3D Printing: current use in facial plastic and reconstructive surgery.	Hsieh et al.	2017	A review	Plastic surgery	41 articles
Applications of 3-Dimensional Printing in Facial Plastic Surgery.	Schwam et al.	2016	A review	Plastic surgery	5 articles
Clinical applications of three-dimensional printing in otolaryngology-head and neck surgery: A systematic review.	Hong et al.	2019	A review	ENT	61 articles
3D-printed tracheoesophageal puncture and prosthesis placement simulator.	Barber et al.	2018	Open research article	ENT	10 surgeons
Virtual Functional Endoscopic Sinus Surgery Simulation with 3D-Printed Models for Mixed-Reality Nasal Endoscopy.	Barber et al.	2018	Open research article	ENT	Introduce new model
Development and validation of a 3D-printed model of the ostiomeatal complex and frontal sinus for endoscopic sinus surgery training.	Alrasheed et al.	2017	Open research article	ENT	20 surgeons
Three-Dimensional Printing and Its Applications in	Crafts et al.	2017	A review	ENT	76 articles

Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery.

Modifications to a 3D-printed temporal bone model for augmented stapes fixation surgery teaching.	Nguyen et al.	2017	Open research article	ENT	13 surgeons
Emerging Role of Three-Dimensional Printing in Simulation in Otolaryngology.	VanKoeveering et al.	2017	Open research article	ENT	Introduce new model
3D-printed pediatric endoscopic ear surgery simulator for surgical training.	Barber et al.	2016	Open research article	ENT	6 surgeons
Impact of 3D Printing Technology on Comprehension of Surgical Anatomy of Retroperitoneal Tumor.	Yang et al.	2018	Open research article	Digestive surgery	30 participants
The Use of Three-Dimensional Printing Model in the Training of Choledochoscopy Techniques.	Li et al.	2018	Open research article	Digestive surgery	24 surgeons
Three-dimensional printing: review of application in medicine and hepatic surgery.	Yao et al.	2016	A review	Digestive surgery	52 articles
Three-dimensional intracranial middle cerebral artery aneurysm models for aneurysm surgery and training.	Wang et al.	2018	Open research article	Neurosurgery	6 residents
Three-Dimensional Printed Skull Base Simulation for Transnasal Endoscopic Surgical Training.	Zheng et al.	2018	Open research article	Neurosurgery	13 surgeons
Fabrication of cerebral aneurysm simulator with a desktop 3D printer.	Liu et al.	2017	Open research article	Neurosurgery	Introduce new model
Using 3D Printing to Create Personalized Brain Models for Neurosurgical Training and Preoperative Planning.	Ploch et al.	2016	Open research article	Neurosurgery	10 surgeons

A simulated training model for laparoscopic pyloromyotomy: Is 3D printing the way of the future?	Williams et al.	2018	Open research article	Paediatric surgery	27 surgeons
Digital Design and 3D Printing of Aortic Arch Reconstruction in HLHS for Surgical Simulation and Training.	Chen et al.	2018	Open research article	Paediatric surgery	Introduce new model
Realistic 3D-Printed Tracheobronchial Tree Model from a 1-Year-Old Girl for Pediatric Bronchoscopy Training.	Hornung et al.	2017	Open research article	Paediatric surgery	Introduce new model
Current status of 3D printing in spine surgery.	Garg et al.	2018	A review	Orthopaedic Surgery	42 articles
Three-Dimensional Printing of Life-Like Models for Simulation and Training of Minimally Invasive Cardiac Surgery.	Yamada et al.	2017	Open research article	Cardiac surgery	Introduce new model
Systematic Review of the Use of 3-Dimensional Printing in Surgical Teaching and Assessment.	Langridge et al.	2018	A review	Surgery	49 articles
3D printing for preoperative planning and surgical training: a review.	Ganguli et al.	2018	A review	Surgery	138 articles
Three-dimensional printing of surgical anatomy.	Powers et al.	2016	A review	Surgery	27 articles
Technology for teaching: New tools for 21st century surgeons.	Eskander et al.	2016	A review	Surgery	39 articles

3.4 Réseaux sociaux

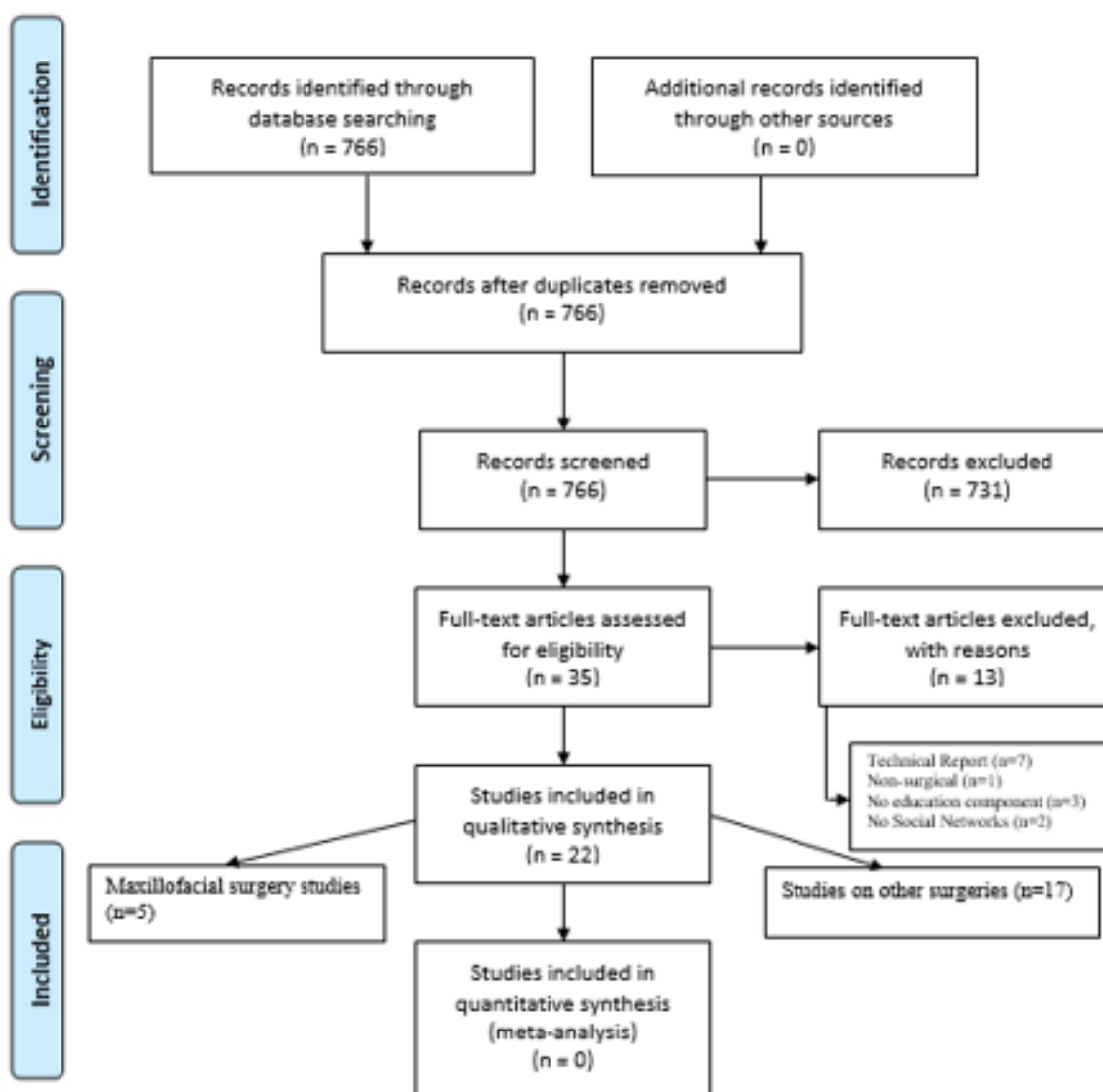


Figure 5. Diagramme de flux PRISMA concernant les réseaux sociaux dans la formation chirurgicale

Pendant la dernière décennie, la popularité des médias sociaux n’a cessé d’augmenter à un rythme effréné [86]. Les réseaux sociaux permettent de rassembler les personnes autour d’une ou plusieurs idées pour créer, partager et échanger librement des données avec les autres [87–89]. Certains réseaux sociaux sont bien connus : Facebook® (Facebook, Menlo Park, Etats-Unis) (1 milliard d’utilisateurs), Instagram® (Facebook, Menlo Park, Etats-Unis) (500 millions), Twitter® (Twitter, San

Francisco, Etats-Unis) (500 millions), YouTube® (Google, San Bruno, Etats-Unis), Pinterest® (Pinterest, Palo Alto, Etats-Unis) ou LinkedIn® (Microsoft, Sunnyvale, Etats-Unis). Ils sont utilisés quotidiennement dans le cadre de la vie privée ce qui facilite leur utilisation dans le cadre professionnel car aucune formation préalable n'est nécessaire [90]. Actuellement, les réseaux sociaux sont plus utilisés à des fins promotionnelles qu'à des fins pédagogiques [91]. L'un de leurs principaux avantages est la réactivité et l'investissement au quotidien de la population par rapport au site Web traditionnel, ce qui rend ces réseaux très intéressants pour délivrer des messages éducatifs [91].

Le niveau d'interaction d'un chirurgien avec ses pairs est associé à des performances plus élevées lors des évaluations [92]. Les médias sociaux favorisent cette interaction. « Dans la vraie vie », il n'est pas toujours aisé de créer des liens avec ses supérieurs. Twitter peut être un moyen de les développer. Ces échanges peuvent s'avérer bénéfiques non seulement pour l'interne, mais aussi pour son chef, souvent sous la forme d'un « apprentissage inversé » dans lequel les mentors peuvent par exemple s'enquérir des technologies émergentes [93]. L'utilisation de ces réseaux autorise une attitude active (la publication de commentaires) ou passive (en se contentant de « liker »). Une étude a démontré qu'il y avait plus de commentaires en semaine que le week-end, ce qui signifie que les médecins préfèrent utiliser ces médias au travail plutôt que pendant leur temps libre. L'activité sur les réseaux est importante car elle favorise les interactions, elle permet d'améliorer le niveau de compétence des chirurgiens en leur permettant de réagir de façon discursive aux idées des uns et des autres et ainsi de construire une analyse plus robuste et détaillée des expériences de chacun [94].

Avec le planning imposant et imprévisible des étudiants en chirurgie, trouver du temps pour se former n'est pas chose aisée. L'accès à l'information 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, pourrait répondre en partie à leurs attentes [94,95]. De ce fait, un nouveau concept est apparu, le « Pull Learning ». Il fournit un cadre dans lequel les internes doivent rechercher les connaissances par eux-mêmes. Une expérience originale s'est déroulée sur 4 mois pendant lesquels une question par jour était posée à des étudiants sur Twitter® ; les meilleurs étaient récompensés chaque semaine. Une évaluation finale a comparé deux groupes d'élèves, ceux qui avaient suivi le programme et les autres. Les meilleurs résultats furent observés dans le premier groupe. Le fait d'ajouter des récompenses permet de rendre ludique l'expérience et mobilise l'esprit de compétition qui anime une bonne partie des étudiants en médecine pour qu'ils puissent donner le meilleur d'eux-mêmes. Par ailleurs, l'apprentissage sous forme de quiz semble être plus populaire que la diffusion d'articles, de vidéos ou de messages plus traditionnels [96].

En postant des messages sur Twitter®, les réactions sont quasi-immédiates, ce qui permet aux étudiants en chirurgie d'obtenir des pistes de progrès rapides [90,97]. Le crowdsourcing est une autre façon d'évaluer les capacités en éliminant les affects qui peuvent exister entre un chirurgien sénior et son apprenti. Il semble que l'opinion de plusieurs personnes inexpérimentées quand elles sont suffisamment nombreuses peut conduire à la même opinion qu'un chirurgien expert. Ce processus peut être un peu lent, bien sûr, en rémunérant les évaluateurs, les résultats sont obtenus de manière bien plus rapide [98].

L'utilisation de hashtags a complètement changé la façon d'effectuer ses recherches sur internet et également la manière de faire de la publicité, par exemple pour les

congrès [8,87,91,95,99]. Les revues scientifiques ont bien compris l'intérêt de ces réseaux. En effet, elles ont développé le #VisualAbstract. Il s'agit d'un résumé visuel concis de la conclusion principale d'un article, qui est ensuite affiché sur les réseaux [87,88].

Les cours massifs en ligne et en accès libre, sont une nouvelle façon d'offrir de façon interactive des modalités d'apprentissage sur Internet, en offrant un accès gratuit à des cours universitaires pour un nombre illimité de participants provenant du monde entier. Des modules tels que des conférences, des cas cliniques interactifs, des animations 3D, des serious games et des entrevues avec des experts peuvent être proposés [100,101]. Ce type de cours virtuel a été comparé à un cours magistral en amphithéâtre plus traditionnel, et a montré des résultats similaires en termes d'acquisition de connaissances. Cette méthode d'enseignement a été très appréciée par les étudiants [102].

Par ailleurs, les chaînes vidéo comme YouTube® sont de grands atouts pour les jeunes chirurgiens. Ils peuvent alors observer et réobserver des interventions chirurgicales et mettre sur pause si nécessaire, ce qui est impossible dans la vraie vie au bloc opératoire. Beaucoup de ces liens vidéos peuvent être partagés par Twitter® ou Facebook® [95]. Construire une base de données de vidéos chirurgicales semble être une perspective très intéressante pour la formation des plus jeunes. Il est alors possible de réaliser des montages en ajoutant des commentaires ou des pauses explicatives pour souligner les points importants et/ou délicats afin que la vidéo accroisse son potentiel éducatif [103].

La principale plate-forme numérique de chirurgie en direct est Advances In Surgery Channel® (AIS Corporate, Barcelone, Espagne) [88]. VuMedi® (Vumedi, inc.,

Oakland, Etats-Unis) enseigne des techniques spécifiques à travers des vidéos et des conférences dans plusieurs domaines. Ces vidéos ne remplaceront pas le compagnonnage traditionnel, mais sont plutôt une alternative pédagogique complémentaire dans un monde en constante évolution [104]. Les projets collaboratifs comme Wikipedia® (Wikimedia Foundation, San Francisco, Etats-Unis) ou plus professionnels comme le wiki « sages » créé par la Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons sont d'excellents outils éducatifs qui permettent l'acquisition de connaissances sur l'évolution de la maladie, ainsi que des conseils techniques relatifs à la prise en charge chirurgicale. Ces sites encouragent les membres à participer et à créer plus de wikis [95].

L'une des particularités des réseaux sociaux est leur accès libre pour tous. Il est évident que certaines précautions sont donc nécessaires, en particulier en ce qui concerne le secret professionnel [104]. Chaque professionnel doit garder à l'esprit que toute donnée mise en ligne peut être retrouvée un jour. Chacun doit donc surveiller son langage et éviter toute forme d'intimidation. Il faut être très prudent si l'on rencontre ses patients sur les réseaux, en essayant de les rediriger vers des sites professionnels et surtout en sachant garder ses distances [89,90]. La gestion des médias sociaux et le professionnalisme en ligne deviennent des composantes importantes de l'enseignement chirurgical. Les tutoriels se développent de plus en plus pour former les résidents à l'utilisation appropriée des médias sociaux. Il est très important de savoir qui aura accès aux données publiées : Facebook® permet de sélectionner les observateurs ce que ne permet pas Twitter® [86]. Le manque de vérification de la fiabilité des sources d'information représente un autre obstacle. Le contenu de ces publications n'est pas examiné de manière aussi rigoureuse que dans les revues scientifiques. L'expertise du chirurgien ne peut être vérifiée tout comme ses éventuels

sociaux, fournissant alors une abondance d'outils qui pourront certainement être exploités en chirurgie [95].

En chirurgie dentaire, la valeur potentielle de ces réseaux est reconnue. Certaines études ont montré que les étudiants sont prêts et apprécient l'idée de pouvoir apprendre via les médias sociaux sur leur smartphone. Malheureusement, cette technologie n'est pas encore incluse de manière formelle dans les programmes éducatifs et demeure donc largement sous-utilisée [90,105]. En chirurgie orale et maxillofaciale, une équipe a publié sur l'utilisation de WhatsApp® (Facebook, Menlo Park, Etats-Unis) comme moyen de surveillance des patients. Toutes les informations médicales recueillies au cours de la visite ont été transcrites sur l'application. Cela permettait à toute l'équipe soignante d'être au courant de la situation sans être physiquement présente. Il était également possible de diffuser rapidement toute information concernant la vie du service [106]. Cependant, la prudence est de mise car ce type d'application n'a que trop peu de protection contre le piratage.

TABLEAU 5. Articles concernant les réseaux sociaux dans la formation chirurgicale

Title	Authors	Publication Year	Article Type	Surgical Specialty	Number of subjects
Virtual versus traditional classroom on facial traumatology learning: Evaluation of medical student's knowledge acquisition and satisfaction.	Morice et al.	2020	Non-randomized control trial	Maxillofacial surgery	136 students
Use of WhatsApp in an oral and maxillofacial surgery department at a major trauma centre and its role during major incidents: our experience.	Dungarwalla et al.	2019	Open research article	Maxillofacial surgery	A surgery department

Assessment of digital literacy and use of smart phones among Central Indian dental students.	Saxena et al.	2018	Cross-sectional Study	Oral Surgery	260 students
Teaching Surgical Procedures with Movies: Tips for High-quality Video Clips.	Jacquemart et al.	2016	Open research article	Maxillofacial surgery	7 surgical procedures
The risks and benefits of social media in dental foundation training.	Bhola et al.	2016	A review	Oral Surgery	44 articles
Social media: physicians-to-physicians education and communication.	Fehring et al.	2017	Free article	Orthopaedic surgery	Free opinion
Innovating clinical kidney transplant education by a massive open online course.	Reinders et al.	2016	Letter to the editor	Urological Surgery	An online course
Innovation in Pediatric Surgical Education for General Surgery Residents: A Mobile Web Resource.	Rouch et al.	2015	Open research article	Paediatric Surgery	32 residents
Social Media in Surgical Training: Opportunities and Risks.	Ovaere et al.	2018	A review	Surgery	43 articles
Social Media as a Platform for Surgical Learning: Use and Engagement Patterns Among Robotic Surgeons.	Myers et al.	2018	Open research article	Surgery	A Facebook group
The comparison of teaching efficiency between massive open online courses and traditional courses in medicine education: a systematic review and meta-analysis.	Zhao et al.	2018	Meta-analysis	Surgery	4 studies
Educational content and the use of social media at US departments of surgery.	Nikolian et al.	2018	Open research article	Surgery	32 Twitter accounts
The academic tweet: Twitter as a tool to advance academic surgery.	Logghe et al.	2018	A review	Surgery	69 articles

Gamified Twitter Microblogging to Support Resident Preparation for the American Board of Surgery In-Service Training Examination.	Lamb et al.	2017	Open research article	Surgery	45 residents
Social Media: Changing the Paradigm for Surgical Education.	Petrucci et al.	2017	A review	Surgery	50 articles
Getting Started: A Social Media Primer.	Ferguson et al.	2017	A review	Surgery	55 articles
Balancing Privacy and Professionalism: A Survey of General Surgery Program Directors on Social Media and Surgical Education.	Langenfeld et al.	2016	Open research article	Surgery	110 program directors
Evaluating the Use of Twitter to Enhance the Educational Experience of a Medical School Surgery Clerkship.	Reames et al.	2016	Open research article	Surgery	66 students
Social Networks, Social Media, and Innovating Surgical Education.	Vohra et al.	2015	Open research article	Surgery	An opinion
Using Social Media to Increase Accessibility to Online Teaching Resources.	O'Kelly et al.	2015	Open trial	Surgery	93 students
Crowd-Sourced Assessment of Technical Skills: a novel method to evaluate surgical performance.	Chen et al.	2014	Open research article	Surgery	1 robotic experiment
An exploration of the use of social media by surgical colleges.	Ralston et al.	2014	Open research article	Surgery	5 organizations

3.5 Serious Games

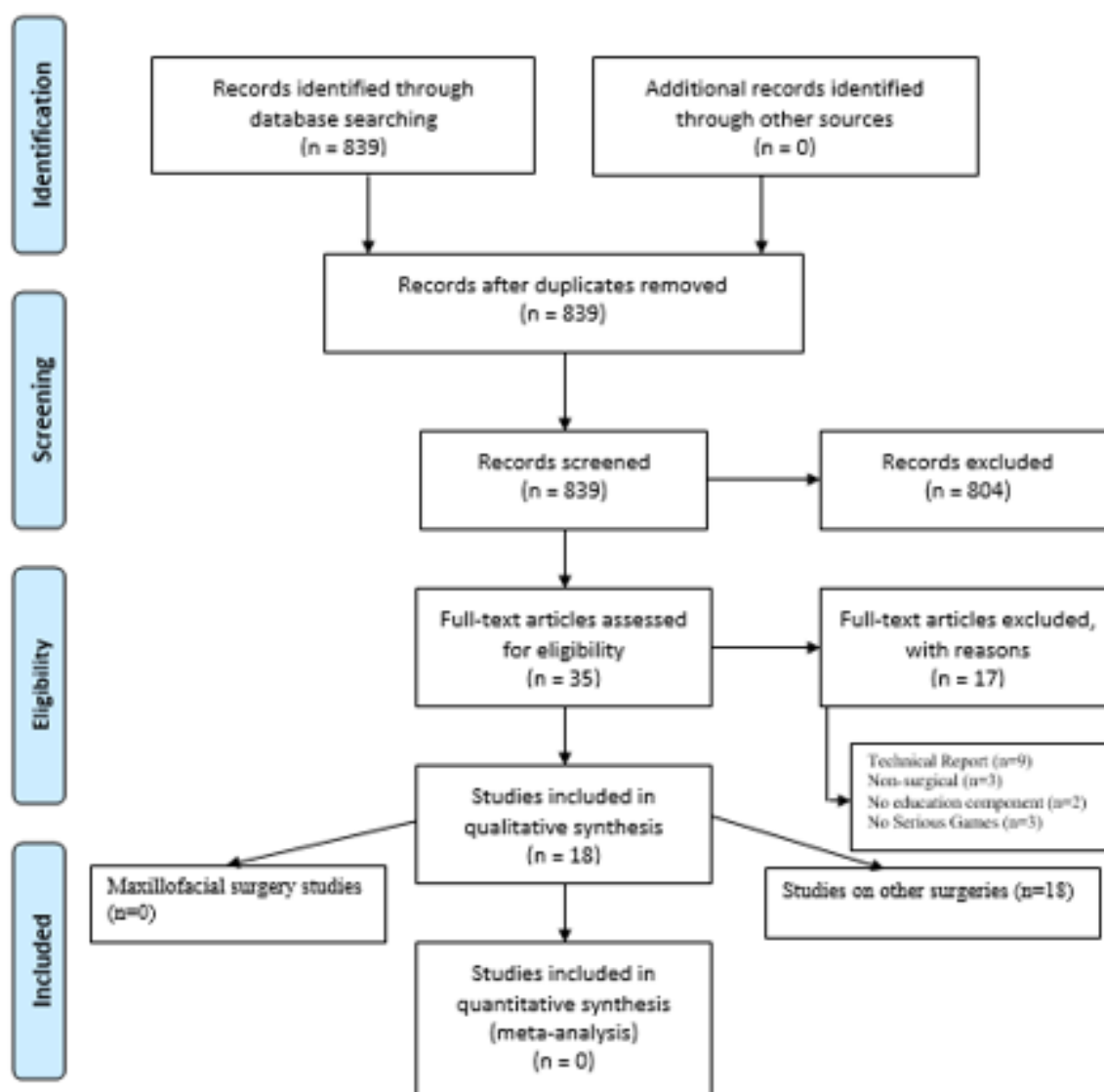


Figure 7. Diagramme de flux PRISMA concernant les serious games dans la formation chirurgicale

La difficulté d'accès aux cadavres et l'augmentation du nombre d'étudiants dans les blocs opératoires semblent être autant d'obstacles à un enseignement chirurgical de qualité. La société réclame des chirurgiens de plus en plus spécialisés formés de façon rentable et rapide. Il devient donc nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'enseignement [107–109].

Prenez un sujet qui à première vue semble peu attrayant et rébarbatif, et fusionnez-le avec les technologies modernes du divertissement, afin d'obtenir un produit ludique qui stimule le désir d'apprendre des étudiants. Vous obtiendrez alors ce que nous pouvons décrire comme un serious game. Ils permettent de transmettre des connaissances ou des capacités chirurgicales tout en apportant un sentiment de plaisir, ce qui permet de capter l'attention des étudiants de la même manière que le ferait un jeu traditionnel [110–112]. Un serious game peut être défini comme n'importe quel logiciel ayant un but autre que le jeu [113]. Un jeu sérieux bien conçu combine des facteurs psychologiques, un design et une technologie suffisante pour donner l'envie de commencer et de poursuivre un apprentissage [108].

Le serious game peut servir à différents stades de la prise en charge du patient. En orthopédie par exemple, pour aider les élèves à mieux gérer les saignements per-opératoires, une simulation a été développée avec différentes fonctionnalités telles que les jeux en réseaux ou des défis chronométrés [110]. Un autre logiciel de chirurgie plastique appelé Z-DOC permet aux étudiants de pratiquer des plasties en Z, avec un système de score [111]. PeriopSim® (Expérience Conquer, Surrey, Canada) est une application neurochirurgicale qui enseigne aux débutants le nom des différents instruments chirurgicaux avec un système de score et un temps défini, afin de favoriser la compétition entre étudiants et les motiver à apprendre [114]. Un jeu d'arcade s'intéresse à la gestion des événements indésirables et aux dysfonctionnements des équipements. Ce jeu a montré qu'une haute fidélité graphique n'est pas forcément nécessaire pour offrir un enseignement de qualité tant que la fluidité de fonctionnement est suffisante [112].

D'autres jeux se concentrent sur le préopératoire en se focalisant sur la partie diagnostique. L'un d'eux, par exemple, place l'étudiant aux urgences. Il doit alors prendre en charge le patient, du diagnostic jusqu'au traitement médical, et l'expose aux conséquences de ses erreurs comme les effets indésirables de certains traitements [115]. Un autre simulateur de patients a été créé pour former les jeunes chirurgiens au diagnostic, en leur offrant une grande liberté à l'interrogatoire et dans le choix des examens complémentaires [116,117]. La gamification peut également passer par l'intermédiaire de quiz, dans lesquels la pression du chronomètre et la concurrence sont utilisées pour stimuler la motivation intrinsèque du joueur. Ce système est utilisé en chirurgie viscérale pour le diagnostic et la gestion des maladies du tractus biliaire ou encore en ORL pour diagnostiquer les pathologies du tympan [108,118].

Des logiciels grands publics sont détournés à des fins médicales. C'est le cas de Second Life® (Linden Lab, San Francisco, Etats-Unis), l'un des plus populaires univers 3D en ligne, qui a été utilisé par l'Imperial College de Londres pour aider les chirurgiens débutants à se familiariser avec le bloc opératoire. Son accessibilité depuis n'importe quel ordinateur relié à internet et la possibilité de répéter les expériences aussi souvent que nécessaire constituent des qualités plus qu'intéressantes pour ce dispositif [95].

L'application la plus utilisée dans la formation chirurgicale actuellement est Touch Surgery® (Touch Surgery Enterprise, Londres, Royaume-Uni). Il s'agit d'un simulateur gratuit qui donne accès à un catalogue de plusieurs centaines d'opérations et de procédures. Cette application utilise une approche cognitive. Elle détaille les différentes étapes chirurgicales, de la préparation du patient à la fermeture, en passant

par la sélection des différents instruments. L'évaluation de chaque étape se fait par des questions à choix multiples. Des graphiques et des animations viennent s'ajouter pour créer un outil interactif de simulation [107,109,113,119–121]. Cette application augmente plutôt les capacités cognitives que les capacités techniques des étudiants. Certaines études ont montré que son utilisation semblait supérieure à l'enseignement traditionnel [109,113,119–121]. L'examen systématique de ses erreurs est très utile tout comme la possibilité de répéter indéfiniment. Grâce à cette formation, anticiper la prochaine étape devient une seconde nature. Par ailleurs, les chirurgiens expérimentés qui enseignent ont souvent tendance à mettre l'accent sur les moments critiques des interventions tout en négligeant ou en ignorant tout simplement les étapes effectuées de manière automatique. Touch Surgery® ne fait pas cette différence et traite toutes les étapes avec la même importance. Les différentes études montrent que les étudiants sont très enthousiastes à l'idée d'intégrer cette application dans leur curriculum. Cette application pourrait réduire de manière considérable la durée d'apprentissage [109,113,119–121]. Les reproches que nous pourrions faire à ce logiciel sont qu'il n'offre qu'une seule approche pour chaque opération et qu'il n'a pas d'influence sur la dextérité et les compétences manuelles des étudiants [109,113,121].

Les serious games ne sont pas nécessairement informatisés. En effet, une initiative originale en chirurgie vasculaire a réutilisé le concept de « l'escape room » (ce concept populaire où les participants doivent résoudre des énigmes en une heure pour sortir de la salle) en utilisant des défis nécessitant des compétences chirurgicales pour débloquer la sortie. Les élèves ont exprimé un haut niveau de satisfaction à l'égard de cette expérience, qui encourageait la collaboration et la communication entre les participants [122].

Les serious games valides ont le potentiel de raccourcir les courbes d'apprentissage des internes en chirurgie dans le raisonnement clinique et la résolution de problèmes et ainsi d'accroître l'efficacité de la formation chirurgicale. L'une des idées de la formation clinique est de passer du déclaratif (« que faire ») à la connaissance procédurale (« comment le faire »). Ces applications ont été très bien accueillies par les étudiants et ils espèrent pouvoir les utiliser davantage dans leur entraînement [108,110,111,114–117]. Tous ces nouveaux « jeux » permettent avant tout d'apporter une expérience aux apprenants sans risquer de causer des dommages à de vrais patients, dans un cadre sécurisé, et permettent au formateur d'évaluer les connaissances des étudiants avant l'entrée au bloc opératoire. Il semble qu'un accès précoce à la simulation soit prépondérant dans la formation chirurgicale [25,107,108,110,119]. Dans tous ces « jeux », un debriefing semble indispensable que ce soit sous la forme d'une correction informatique automatisée ou d'une séance d'explication par un formateur [116,117].

Le coût élevé du développement de ces nouveaux logiciels est l'un des principaux obstacles à l'expansion de ces technologies (environ 200 000 euros pour un jeu de simulation) [95,115]. D'autres études sont nécessaires pour évaluer l'utilisation volontaire de la part des étudiants. En effet, si il est nécessaire de forcer l'usage, l'intérêt s'en trouve alors fortement diminué [112]. L'ajout de niveaux de difficulté permettrait de parler à un panel plus large de chirurgiens. L'information retenue à long terme est également une donnée à évaluer dans les études futures [119,120]. Bien sûr, nous ne devons pas oublier qu'un patient est plus complexe que n'importe quelle application. Tous ces moyens didactiques doivent donc rester des outils complémentaires de la méthode traditionnelle [116,117].

En chirurgie maxillofaciale, il n'existe pas d'étude sur le sujet. Mais nous pouvons imaginer que ces innovations technologiques pourraient très bien profiter à notre spécialité. Actuellement, environ 19 procédures de chirurgie maxillofaciale sont présentes sur Touch Surgery®, telles que la condylectomie mandibulaire, le management des dislocations orbito-naso-ethmoïdo-frontales ou encore le lambeau antérolatéral de cuisse. Il faut donc espérer que ces programmes ne resteront pas de simples sujets d'étude, mais qu'ils intégreront rapidement les protocoles de formation chirurgicale.

TABLEAU 6. Articles concernant les serious games dans la formation chirurgicale

Title	Authors	Publication Year	Article Type	Surgical Specialty	Number of subjects
Interactive iPhone/iPad App for Increased Tympanic Membrane Familiarity.	Samra et al.	2016	Open trial	ENT	21 students
Serious Games in Surgical Medical Education: A Virtual Emergency Department as a Tool for Teaching Clinical Reasoning to Medical Students.	Chon et al.	2019	Non-randomized control trial	Digestive surgery	140 students
Validation of the mobile serious game application Touch Surgery™ for cognitive training and assessment of laparoscopic cholecystectomy.	Kowalewski et al.	2017	Non-randomized control trial	Digestive surgery	105 participants
Game-based training improves the surgeon's situational awareness in the operation room: a randomized controlled trial.	Graafland et al.	2017	Randomized control trial	Digestive surgery	24 participants

Embedding a Virtual Patient Simulator in an Interactive Surgical lecture.	Kleinert et al.	2016	Open research article	Digestive surgery	360 students
Design, Realization, and First Validation of an Immersive Web-Based Virtual Patient Simulator for Training Clinical Decisions in Surgery.	Kleinert et al.	2015	Open research article	Digestive surgery	25 students
A serious game can be a valid method to train clinical decision-making in surgery.	Graafland et al.	2014	Open research article	Digestive surgery	41 participants
A pilot study to assess the utility of a freely downloadable mobile application simulator for undergraduate clinical skills training: a single-blinded, randomised controlled trial.	Bartlett et al.	2017	Randomized control trial	Urological Surgery	62 students
Using Touch Surgery to Improve Surgical Education in Low- and Middle-Income Settings: A Randomized Control Trial.	Bunogerane et al.	2018	Randomized control trial	Orthopaedic surgery	27 surgery residents
The technological evolution in surgical skills.	Seewoonarain et al.	2017	Open research article	Orthopaedic surgery	Expert opinion
A Mobile-Based Surgical Simulation Application: A Comparative Analysis of Efficacy Using a Carpal Tunnel Release Module.	Amer et al.	2017	Open trial	Orthopaedic surgery	100 students
Learning blood management in orthopedic surgery through gameplay.	Qin et al.	2010	Open research article	Orthopaedic surgery	Introduce a new software
Break out of the Classroom: The Use of Escape Rooms as an Alternative Teaching Strategy in Surgical Education.	Kinio et al.	2019	Open research article	Vascular surgery	13 participants
Simulation-based training for burr hole surgery instrument recognition.	Clarke et al.	2016	Randomized study	Neurosurgery	18 trainees

Z-DOC: a serious game for Z-plasty procedure training.	Shewaga et al.	2013	Open research article	Plastic surgery	Introduce a new software
Creation and Global Deployment of a Mobile, Application-Based Cognitive Simulator for Cardiac Surgical Procedures.	Brewer et al.	2016	Open randomized trial	Cardiothoracic surgery	16 students
Social Media: Changing the Paradigm for Surgical Education.	Petrucci et al.	2017	A review	Surgery	50 articles
Technology for teaching: New tools for 21st century surgeons.	Eskander et al.	2016	A review	Surgery	39 articles

3.6 Réalité virtuelle

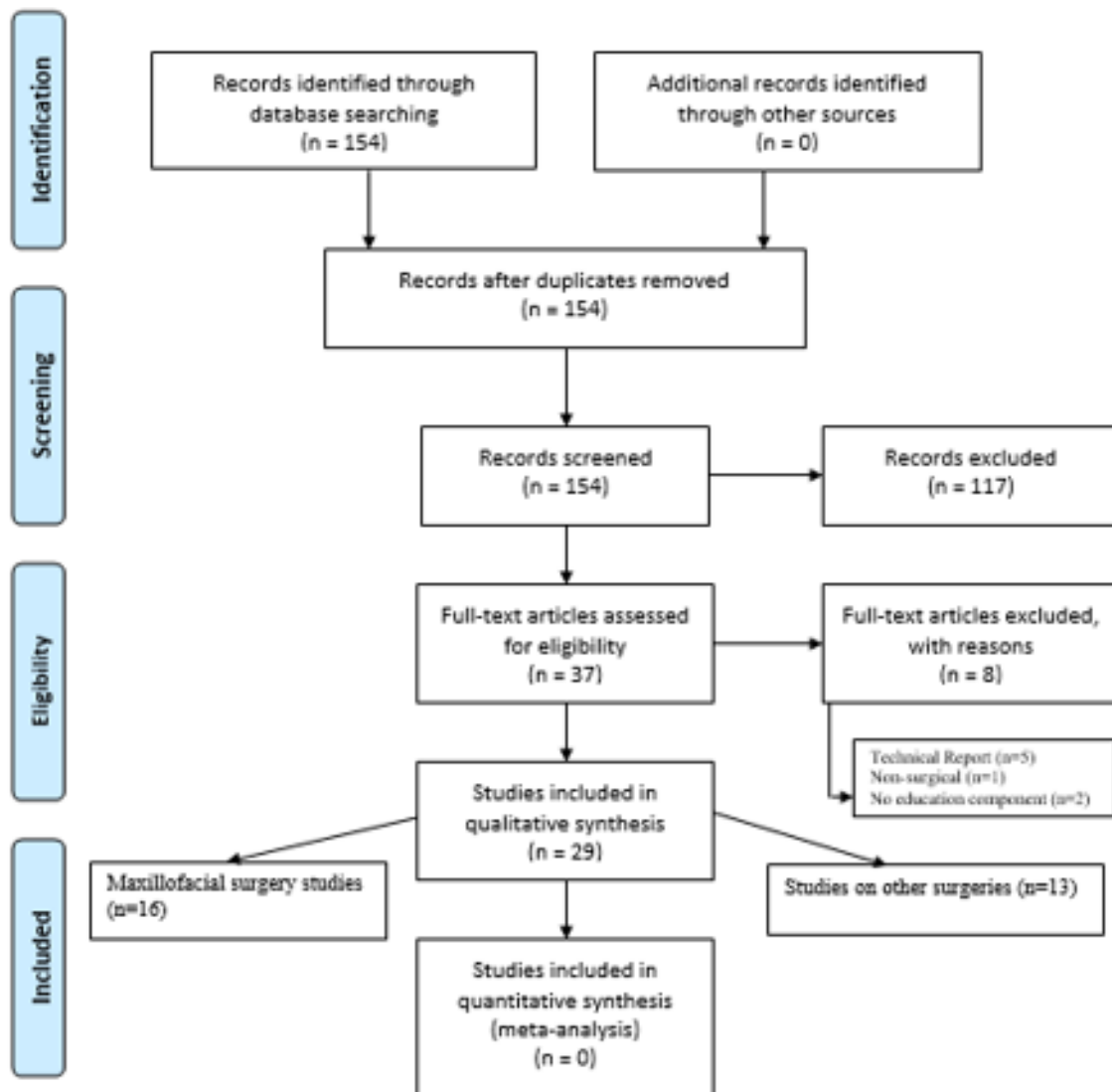


Figure 8. Diagramme de flux PRISMA concernant la réalité virtuelle dans la formation chirurgicale

La diminution des horaires de travail et les demandes des patients visant à réduire au minimum la participation des internes à leurs soins ont réduit les possibilités de formation [81,123–126]. Le manque de disponibilité et le coût élevé des cadavres humains ont poussé à la recherche d'autres alternatives éducatives [81,127,128]. Il est difficile d'équilibrer la balance entre la nécessité d'une formation chirurgicale de qualité et la sécurité des patients [129]. « D'abord observer puis pratiquer sur un patient » ne

semble plus être la technique éducative idéale. L'interne doit devenir plus indépendant dans son parcours d'apprentissage [130,131]. C'est ainsi que le premier simulateur de réalité virtuelle a été développé en endoscopie, probablement car l'interface est similaire [129,132].

Un simulateur est défini comme un dispositif remplaçant le monde réel ou quelques-uns de ses composants, par une simulation permettant aux utilisateurs d'acquérir de l'expérience et des compétences en interagissant avec des signaux visuels, tactiles et auditifs [81,131,133]. Les points essentiels de la chirurgie en réalité virtuelle sont l'expérience d'une salle d'opération visualisable à 360°, une perception stéréoscopique de la chirurgie et la possibilité d'une interaction 3D [123]. On peut différencier la réalité virtuelle non immersive (l'utilisateur ne se focalise que sur la tâche à accomplir), la réalité virtuelle immersive (l'utilisateur et sa tâche s'intègrent dans un monde virtuel) et la réalité augmentée (la réalité virtuelle vient s'ajouter à la réalité) [133]. Pour développer un bon simulateur, il est important de bien identifier les erreurs qui peuvent se produire lors des interventions chirurgicales et de les intégrer dans la simulation [127]. Le développement d'un bon retour haptique est un élément fondamental pour créer un simulateur de qualité [127,134].

La réalité virtuelle possède de nombreux avantages, notamment la possibilité de répéter la même tâche plusieurs fois sur différentes anatomies et pathologies [126,128,132,134–136]. Cet entraînement ne met pas en danger les patients [125,128,131,135,137–139]. Il est possible d'échouer sans conséquence, ce qui ne serait pas éthique dans la vie réelle [131,140]. Ces simulateurs ont pu montrer une réduction significative des complications opératoires réelles en permettant aux jeunes chirurgiens de s'entraîner avant d'opérer de vrais patients [131,137,141]. La réalité

virtuelle donne accès à des opérations rares et complexes qui ne sont pas accessibles aux novices dans la vie [132,139]. Elle permet également aux jeunes chirurgiens d'être exposés à des complications qui se produisent rarement [131,133,139,140]. Des études ont montré qu'après cinq à sept répétitions d'une même intervention, la courbe d'apprentissage atteint un plateau [126,142]. Certaines études mettent en évidence le transfert des capacités qui peut avoir lieu entre la simulation virtuelle et le bloc opératoire [134,143]. Cette formation semble supérieure à l'enseignement traditionnel en terme de temps opératoire et d'efficacité dans la gestuelle [81,125,126,130–132,134,136,144]. D'autres études montrent une durée d'apprentissage divisée par 5 par rapport aux méthodes traditionnelles [123,126,130,145]. Il semble que quatre heures de formation sur un simulateur de réalité virtuelle soit beaucoup plus efficace qu'une demi-journée de formation traditionnelle [25]. Ce gain de temps pourrait alors être utilisé pour acquérir des compétences non techniques comme l'éthique, la gestion psychologique des patients et le travail d'équipe [145]. Il semble que le réalisme de la simulation et la difficulté doivent augmenter avec l'expérience du chirurgien pour mieux s'adapter aux besoins de chacun ; l'établissement de niveaux paraît donc essentiel [126,129,135,145]. La réalité virtuelle augmente également la confiance en soi pour les jeunes chirurgiens avant d'entrer en salle [123,131]. Cela permet aux internes de réagir de façon appropriée dans des circonstances stressantes [123,129]. D'autres simulateurs ont été développés pour accroître le raisonnement diagnostique des apprenants. L'étudiant peut alors se retrouver, par exemple, immergé dans un univers virtuel recréant les urgences où il doit prendre en charge un patient et lui prescrire les bons examens complémentaires [146].

Comme toutes les nouvelles technologies, il y a forcément des défauts et des pistes d'amélioration. Une distinction doit être faite entre le retour intrinsèque et extrinsèque.

Le retour intrinsèque correspond à tous les signaux auditifs, visuels et tactiles qui sont envoyés à l'élève, tandis que le retour extrinsèque correspond aux signaux envoyés par une source externe indiquant directement le succès ou non d'une manœuvre [147]. L'un des défis des années à venir est de développer un système de rétroaction haptique performant, en particulier en chirurgie maxillofaciale, qui est une spécialité étroitement liée à l'os [124,130,131,133,136,139,141,142,144,148]. En effet, la majorité des logiciels de réalité virtuelle n'offre qu'une rétroaction haptique maximale de 12 Newton ce qui est insuffisant pour simuler les gestes osseux [132]. L'utilisation abusive de la rétroaction extrinsèque peut également créer une dépendance et conduire à une diminution de la progression. Cette rétroaction doit donc être utilisée avec parcimonie [145,147]. Une rétroaction extrinsèque finale semble préférable à une rétroaction extrinsèque en continu, et ce afin d'éviter la surcharge d'information [129,145].

L'une des lacunes de la réalité virtuelle est que la plupart des systèmes actuels ne se concentrent que sur les étapes clés de la procédure sans s'attarder sur les tissus environnants [141,144]. La réalité virtuelle immersive, qui recrée tout l'univers du bloc opératoire, contrairement à la réalité virtuelle conventionnelle, qui ne se concentre que sur la procédure chirurgicale, semble être le dernier niveau de préparation avant d'envoyer le jeune chirurgien dans les salles d'opération [138,140]. L'avenir de la réalité virtuelle passera également par le développement d'interactions avec le personnel du bloc opératoire et les différents instruments chirurgicaux. Les décisions prises sur l'environnement auront alors un impact sur la procédure [138,140]. Certains systèmes permettent même de simuler une intervention pour toute une équipe chirurgicale en simultané [139,140]. Par ailleurs, l'hémorragie peropératoire est un autre paramètre important à prendre en compte. Elle est souvent négligée en raison

des propriétés des liquides, qui sont difficiles à intégrer dans le développement des simulateurs [129–131,142].

Comme l'ensemble des nouvelles technologies, le coût actuel est encore très élevé. Mais il est fortement probable qu'il diminue dans les années à venir et les économies en cadavres réalisées sont loin d'être négligeables [123,128,135–137,139]. Certains systèmes comme Google Daydream® (Google, Mountain View, Etats-Unis) et Google Cardboard® (Google, Mountain View, Etats-Unis) pourraient réduire le coût des systèmes de réalité virtuelle [148]. Un article très intéressant utilise une console commerciale de jeux vidéo (la Nintendo Wii U® (Nintendo, Kyoto, Japon)) pour effectuer des procédures laparoscopiques [148]. Les résultats sont très encourageants, et cette piste est très prometteuse pour diffuser cette technologie aux plus grand nombre avec un coût réduit [143]. D'autres études sont nécessaires en particulier pour évaluer le transfert des capacités de la simulation au bloc opératoire [128]. L'excès de confiance créé devra également être étudié dans l'avenir [123].

Cette technologie peut également servir d'évaluation des internes avant de les laisser opérer [129,130,135]. La réalité virtuelle doit être considérée comme une nouvelle arme venant renforcer l'arsenal pédagogique et non comme une modalité d'enseignement qui doit remplacer les autres, car la relation chef-interne ne pourra jamais être totalement remplacée [128,129,131,145]. Cette nouvelle technologie est accueillie avec beaucoup d'enthousiasme par les jeunes chirurgiens [124,132,135,139,148]. Elle doit donc être développée et l'accès étendu à tous [128,131,143,144,148]. Elle devra être intégrée dans les nouveaux programmes de formation chirurgicale [25,125,130,131,133,136,138,139,145,148].



Figure 9. Interaction avec l'anatomie maxillo-faciale sur un modèle 3D.

En chirurgie orale et maxillo-faciale, il n'y a pas beaucoup de simulateurs développés. Un système de réalité virtuelle pour réaliser l'ostéotomie sagittale des branches montantes de la mandibule a été créé [127,141]. Un autre simulateur a été développé pour reproduire l'ostéotomie de Le Fort 1 ; ce système possède la particularité d'être relié à Internet ce qui permet aux chefs de commenter les actions de leurs étudiants [123,132,148]. Certains systèmes sont très intéressants car ils permettent de charger les données spécifiques des patients. Il devient alors possible de préparer les interventions chirurgicales [127,144]. Un autre système de réalité virtuelle a été développé pour la sous-maxillectomie endoscopique [142]. Après DentSim® (Image Navigation Ltd., New York, Usa), le premier simulateur en chirurgie dentaire, d'autres systèmes de réalité virtuelle ont été développés comme VR-MFS, VirTeasy Implant Pro. Ces simulateurs permettent entre autre au chirurgien de réaliser l'avulsion d'une racine dentaire, la mise en place d'implants dentaires, l'avulsion des dents de sagesse, ou encore une résection apicale [81,130,134,135,137,144] Une autre étude intéressante combinant serious game et réalité virtuelle permet aux étudiants

d'explorer la fosse ptérygopalatine sous la forme d'un « jeu de tir à la première personne », avec des questions permettant de découvrir l'anatomie [149]. Même s'il est nécessaire d'améliorer la rétroaction haptique, la réalité virtuelle semble tout à fait appropriée à la chirurgie orale et maxillo-faciale. On peut espérer que son utilisation se démocratise rapidement.

TABLEAU 7. Articles concernant la réalité virtuelle dans la formation chirurgicale

Title	Authors	Publication Year	Article Type	Surgical Specialty	Number of subjects
From CT to 3D Printed Models, Serious Gaming, and Virtual Reality: Framework for Educational 3D Visualization of Complex Anatomical Spaces from Within-the Pterygopalatine Fossa.	Javan et al.	2020	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new software
Simulation-based training in maxillofacial surgery: are we going to be left behind?	Ahmed et al.	2019	Open research article	Maxillofacial surgery	57 students
Haptic, Physical, and Web-Based Simulators: Are They Underused in Maxillofacial Surgery Training?	Maliha et al.	2018	A review	Maxillofacial surgery	17 articles
An innovative virtual reality training tool for orthognathic surgery.	Pulijala et al.	2018	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new software
High Fidelity Virtual Reality Orthognathic Surgery Simulator.	Arikatla et al.	2018	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce a new software
A review of haptic simulator for oral and maxillofacial surgery based on virtual reality.	Chen X et al.	2018	A review	Maxillofacial surgery	103 articles
Effectiveness of Immersive Virtual Reality	Pulijala et al.	2018	randomized control trial	Maxillofacial surgery	91 residents

in Surgical Training-A
Randomized Control Trial.

Development of a virtual reality training system for endoscope-assisted submandibular gland removal.	Miki et al.	2016	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new software
A virtual training system for maxillofacial surgery using advanced haptic feedback and immersive workbench.	Wu et al.	2014	Open research article	Maxillo-facial surgery	Introduce new software
Failure mode and effects analysis in designing a virtual reality-based training simulator for bilateral sagittal split osteotomy.	Sofronia et al.	2013	Open research article	Maxillofacial surgery	Introduce new software
A patient-specific haptic drilling simulator based on virtual reality for dental implant surgery.	Chen et al.	2018	Open research article	Oral surgery	Introduce new software
Learning by doing virtually.	von Sternberg et al.	2007	Open randomized trial	Oral surgery	41 students
Computerized Virtual Reality Simulation in Preclinical Dentistry: Can a Computerized Simulator Replace the Conventional Phantom Heads and Human Instruction?	Plessas	2017	A review	Dental surgery	16 articles
Comparison of oral surgery task performance in a virtual reality surgical simulator and an animal model using objective measures.	Ioannou et al.	2015	Open non-randomized trial	Dental surgery	14 students
Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school.	Pohlenz et al.	2010	Open research article	Dental surgery	Introduce new software
Effect of augmented visual feedback from a virtual reality simulation system on manual dexterity training.	Wierinck et al.	2005	Open randomised trial	Dental surgery	42 students
Playing to your skills: a randomised controlled trial evaluating a dedicated	Harrington et al.	2018	Single-blinded randomised control trial	Digestive surgery	20 students

video game for minimally invasive surgery.					
New dimensions in surgical training: immersive virtual reality laparoscopic simulation exhilarates surgical staff.	Huber et al.	2017	Non-randomized trial	Digestive surgery	10 participants
Establishing the minimal number of virtual reality simulator training sessions necessary to develop basic laparoscopic skills competence: evaluation of the learning curve.	Duarte et al.	2013	Non-randomized trial	Digestive surgery	11 students
Cognitive load and performance in immersive virtual reality versus conventional virtual reality simulation training of laparoscopic surgery: a randomized trial.	Frederiksen et al.	2019	randomized control trial	Gynaecological surgery	31 residents
Design of a Serious Game for Handling Obstetrical Emergencies.	Jean Dit Gautier et al.	2016	Open research article	Gynaecological surgery	Introduce a new software
Virtual Reality-Based Simulators for Cranial Tumor Surgery: A Systematic Review.	Mazur et al.	2018	A review	Neurosurgery	9 articles
Virtual reality cerebral aneurysm clipping simulation with real-time haptic feedback.	Alaraj et al.	2015	Open research article	Neurosurgery	Introduce new software
Virtual reality simulation: basic concepts and use in endoscopic neurosurgery training.	Cohen et al.	2013	A review	Neurosurgery	29 articles
The development of a virtual simulator for training neurosurgeons to perform and perfect endoscopic endonasal transsphenoidal surgery.	Rosseau et al.	2013	Open research article	Neurosurgery	Introduce New Software
Role of cranial and spinal virtual and augmented reality simulation using immersive touch modules in neurosurgical training.	Alaraj et al.	2013	Open research article	Neurosurgery	Introduce New Software

Endovascular repair of ruptured abdominal aortic aneurysm: technical and team training in an immersive virtual reality environment.	Rudarakanchana et al.	2014	Non-randomized trial	Vascular surgery	10 operating room teams
Technology for teaching: New tools for 21st century surgeons.	Eskander et al.	2016	A review	Surgery	39 articles
The role and validity of surgical simulation.	Agha et al.	2015	A review	Surgery	79 articles

4. Conclusion

Des pistes prometteuses se profilent donc pour la formation chirurgicale. Les technologies les plus avancées actuellement pour une intégration rapide dans la vie quotidienne sont les réseaux sociaux et l'impression 3D. En effet, ce sont les méthodes d'enseignement les plus accessibles financièrement et qui ne nécessitent pas l'intervention de tiers pour la mise en route. En ce qui concerne la chirurgie orale et maxillo-faciale, l'impression 3D semble être la technologie la plus prometteuse notamment pour recréer les structures osseuses.

Ces progrès ne doivent pas être pris individuellement, mais plutôt dans leur ensemble. Ainsi, nous pouvons imaginer la formation chirurgicale idéale de demain. Elle commencerait par une acquisition des connaissances théoriques, grâce aux modèles 3D, grâce à l'exploration en réalité virtuelle de l'anatomie, grâce aux modes dynamiques de diffusion des données par les réseaux sociaux ou encore grâce aux jeux éducatifs. Ensuite, l'étudiant pourrait commencer une formation pratique en s'exerçant en réalité virtuelle sur des modèles 3D, le tout sous la forme de serious game afin d'augmenter la motivation des participants. Enfin, la dernière étape avant l'autonomisation serait un telementoring avec une qualité d'image optimale grâce aux meilleures techniques d'open field camera.

Conformité aux normes éthiques

Déclarations d'intérêt : aucune

Financement

Cette recherche n'a reçu aucune subvention spécifique d'organismes de financement des secteurs public, commercial ou sans but lucratif.

5. Figures et Tableaux

Figure 10. Diagramme de flux PRISMA concernant l'open field camera dans la formation chirurgicale.....	13
Figure 11. Diagramme de flux PRISMA concernant la télémédecine dans la formation chirurgicale.....	18
Figure 12. Diagramme de flux PRISMA concernant l'impression 3D dans la formation chirurgicale.....	26
Figure 13. Modèles imprimés 3D utilisés dans l'éducation à la craniosynostose : un exemple d'utilisation de l'impression 3D dans l'éducation cranio-maxillo-faciale.....	32
Figure 14. Diagramme de flux PRISMA concernant les réseaux sociaux dans la formation chirurgicale.....	40
Figure 15. Word Cloud sur les réseaux sociaux.....	45
Figure 16. Diagramme de flux PRISMA concernant les serious games dans la formation chirurgicale.....	49
Figure 17. Diagramme de flux PRISMA concernant la réalité virtuelle dans la formation chirurgicale.....	57
Figure 18. Interaction avec l'anatomie maxillo-faciale sur un modèle 3D.....	62
Tableau 1. Stratégie de recherche documentaire.....	10
Tableau 2. Articles concernant l'open field camera dans la formation chirurgicale...	16
Tableau 3. Articles concernant la télémédecine dans la formation chirurgicale.....	23
Tableau 4. Articles concernant l'impression 3D dans la formation chirurgicale.....	35
Tableau 5. Articles concernant les réseaux sociaux dans la formation chirurgicale..	46
Tableau 6. Articles concernant les serious games dans la formation chirurgicale....	54
Tableau 7. Articles concernant la réalité virtuelle dans la formation chirurgicale.....	63

6. Références

- [1] K.G.M. Brown, C.E. Storey, Acquiring surgical skills: the history of surgical teaching at the University of Sydney 1883-2014: History of surgical teaching, *ANZ Journal of Surgery*. 86 (2016) 448–453. <https://doi.org/10.1111/ans.13469>.
- [2] A. Aydin, R. Fisher, M.S. Khan, P. Dasgupta, K. Ahmed, Training, assessment and accreditation in surgery, *Postgraduate Medical Journal*. 93 (2017) 441–448. <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2016-134701>.
- [3] L. Hull, N. Sevdalis, Advances in Teaching and Assessing Nontechnical Skills, *Surgical Clinics of North America*. 95 (2015) 869–884 <https://doi.org/10.1016/j.suc.2015.04.003>.
- [4] C.H. Evans, K.D. Schenarts, Evolving Educational Techniques in Surgical Training, *Surgical Clinics of North America*. 96 (2016) 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.suc.2015.09.005>.
- [5] Netgen, Formation chirurgicale, *Revue Médicale Suisse*. (n.d.). <https://www.revmed.ch/RMS/2009/RMS-209/Formation-chirurgicale> (accessed January 3, 2019).
- [6] T.J. Broderick, K.M. Russell, C.R. Doarn, R.C. Merrell, A Novel Telemedicine Method for Viewing the Open Surgical Field, *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*. 12 (2002) 293–298. <https://doi.org/10.1089/109264202760268113>.
- [7] D. Andersen, V. Popescu, M.E. Cabrera, A. Shanghavi, B. Mullis, S. Marley, G. Gomez, J.P. Wachs, An Augmented Reality-Based Approach for Surgical Telementoring in Austere Environments, *Military Medicine*. 182 (2017) 310–315. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-16-00051>.
- [8] R.S. Vohra, M.T. Hallissey, Social Networks, Social Media, and Innovating Surgical Education, *JAMA Surgery*. 150 (2015) 192. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2014.1324>.
- [9] M. Graafland, W.A. Bemelman, M.P. Schijven, Appraisal of Face and Content Validity of a Serious Game Improving Situational Awareness in Surgical Training, *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*. 25 (2015) 43–49. <https://doi.org/10.1089/lap.2014.0043>.
- [10] Y. Kim, H. Kim, Y.O. Kim, Virtual Reality and Augmented Reality in Plastic Surgery: A Review, *Archives of Plastic Surgery*. 44 (2017) 179–187. <https://doi.org/10.5999/aps.2017.44.3.179>.
- [11] J.U. Pucci, B.R. Christophe, J.A. Sisti, E.S. Connolly, Three-dimensional printing: technologies, applications, and limitations in neurosurgery, *Biotechnology Advances*. 35 (2017) 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.05.007>.

- [12] S.N. Kothari, T.J. Broderick, E.J. DeMaria, R.C. Merrell, Evaluation of Operative Imaging Techniques in Surgical Education, *Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons*. 8 (2004) 367–371.
- [13] K.M. Russell, T.J. Broderick, E.J. DeMaria, S.N. Kothari, R.C. Merrell, Laparoscopic Telescope with Alpha Port and Aesop to View Open Surgical Procedures, *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*. 11 (2001) 213–218.
<https://doi.org/10.1089/109264201750539727>.
- [14] R.O. Chaves, P.A.V. de Oliveira, L.C. Rocha, J.P.F. David, S.C. Ferreira, A. de A.S. dos Santos, R.M. dos S. Melo, E.Y. Yasojima, M.V.H. Brito, An Innovative Streaming Video System With a Point-of-View Head Camera Transmission of Surgeries to Smartphones and Tablets: An Educational Utility, *Surgical Innovation*. 24 (2017) 462–470.
<https://doi.org/10.1177/1553350617715162>.
- [15] L.L. Frasier, D.P. Azari, Y. Ma, S.R. Pavuluri Quamme, R.G. Radwin, C.M. Pugh, T.Y. Yen, C.-H. Chen, C.C. Greenberg, A marker-less technique for measuring kinematics in the operating room, *Surgery*. 160 (2016) 1400–1413. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2016.05.004>.
- [16] N.K. Kottayil, R. Bogdanova, I. Cheng, B. Zheng, A. Basu, Investigation of gaze patterns in multi view laparoscopic surgery, in: 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, Orlando, FL, USA, 2016: pp. 4031–4034. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591611>.
- [17] L. Ganry, N. Sigaux, K.S. Ettinger, S.O. Salman, R.P. Fernandes, Modified GoPro Hero 6 and 7 for Intraoperative Surgical Recording-Transformation Into a Surgeon-Perspective Professional Quality Recording System, *J. Oral Maxillofac. Surg.* 77 (2019) 1703.e1-1703.e6.
<https://doi.org/10.1016/j.joms.2019.03.026>.
- [18] I.-L. Lin, S.-Y. Hsiao, C.-M. Chen, Video-recording using smartphones during surgical procedures in outpatients, *Br J Oral Maxillofac Surg.* 57 (2019) 809–811.
<https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2019.06.008>.
- [19] S. Erridge, D.K.T. Yeung, H.R.H. Patel, S. Purkayastha, Telementoring of Surgeons: A Systematic Review, *Surg Innov.* 26 (2019) 95–111. <https://doi.org/10.1177/1553350618813250>.
- [20] E.M. Bogen, C.M. Schlachta, T. Ponsky, White paper: technology for surgical telementoring—SAGES Project 6 Technology Working Group, *Surg Endosc.* 33 (2019) 684–690.
<https://doi.org/10.1007/s00464-018-06631-8>.
- [21] K.M. Augestad, H. Han, J. Paige, T. Ponsky, C.M. Schlachta, B. Dunkin, J. Mellinger, Educational implications for surgical telementoring: a current review with recommendations for future practice, policy, and research, *Surg Endosc.* 31 (2017) 3836–3846.
<https://doi.org/10.1007/s00464-017-5690-y>.

- [22] P. Gambadauro, R. Torrejón, The “tele” factor in surgery today and tomorrow: implications for surgical training and education, *Surg Today*. 43 (2013) 115–122. <https://doi.org/10.1007/s00595-012-0267-9>.
- [23] T.A. Ponsky, M. Schwachter, J. Parry, S. Rothenberg, K.M. Augestad, Telementoring: The Surgical Tool of the Future, *Eur J Pediatr Surg*. 24 (2014) 287–294. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1386646>.
- [24] H.K. Andreassen, L.L. Warth, The Impact of Telementoring, *Stud Health Technol Inform*. 255 (2018) 127–131.
- [25] M.F. Eskander, M.G. Neuwirth, S. Kuy, H.B. Keshava, J.P. Meizoso, Technology for teaching: New tools for 21st century surgeons, *Bull Am Coll Surg*. 101 (2016) 36–42.
- [26] A.Q. Ereso, P. Garcia, E. Tseng, M.M. Dua, G.P. Victorino, T.S. Guy, Live transference of surgical subspecialty skills using telerobotic proctoring to remote general surgeons, *Journal of the American College of Surgeons*. 209 (2009) S114–S115. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2009.06.285>.
- [27] B. El-Sabawi, W. Magee, The evolution of surgical telementoring: current applications and future directions, *Ann Transl Med*. 4 (2016). <https://doi.org/10.21037/atm.2016.10.04>.
- [28] C.H. Snyderman, P.A. Gardner, B. Lanisnik, J. Ravnik, Surgical telementoring: A new model for surgical training, *Laryngoscope*. 126 (2016) 1334–1338. <https://doi.org/10.1002/lary.25753>.
- [29] A. Budrionis, P. Hasvold, G. Hartvigsen, J.G. Bellika, Assessing the impact of telestration on surgical telementoring: A randomized controlled trial, *J Telemed Telecare*. 22 (2016) 12–17. <https://doi.org/10.1177/1357633X15585071>.
- [30] J.P. Wachs, G. Gomez, Telementoring systems in the operating room: a new approach in medical training, *Medicina (B Aires)*. 73 (2013) 539–542.
- [31] E. Bilgic, S. Turkdogan, Y. Watanabe, A. Madani, T. Landry, D. Lavigne, L.S. Feldman, M.C. Vassiliou, Effectiveness of Telementoring in Surgery Compared With On-site Mentoring: A Systematic Review, *Surg Innov*. 24 (2017) 379–385. <https://doi.org/10.1177/1553350617708725>.
- [32] S.A. Antoniou, G.A. Antoniou, J. Franzen, S. Bollmann, O.O. Koch, R. Pointner, F.A. Granderath, A comprehensive review of telementoring applications in laparoscopic general surgery, *Surg Endosc*. 26 (2012) 2111–2116. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2175-x>.
- [33] J.S. Julien, N.D. Perrier, Video Telementoring to Accelerate Learning of New Surgical Techniques, *JAMA Surg*. 151 (2016) 671–672. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2016.0054>.

- [34] C.M. Schlachta, N.T. Nguyen, T. Ponsky, B. Dunkin, Project 6 Summit: SAGES telementoring initiative, *Surg Endosc.* 30 (2016) 3665–3672. <https://doi.org/10.1007/s00464-016-4988-5>.
- [35] N. Datta, I.T. MacQueen, A.D. Schroeder, J.J. Wilson, J.C. Espinoza, J.P. Wagner, C.J. Filipi, D.C. Chen, Wearable Technology for Global Surgical Teleproctoring, *J Surg Educ.* 72 (2015) 1290–1295. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2015.07.004>.
- [36] J.M. Kaltman, S.P. Best, S.I. Kaltman, Virtual rounding via videoconference-enabled smartphones: a case for multifacility rounds, *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 113 (2012) e15–18. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2011.07.041>.
- [37] N.E. Bruns, S. Irtan, S.S. Rothenberg, E.M. Bogen, H. Kotobi, T.A. Ponsky, Trans-Atlantic Telementoring with Pediatric Surgeons: Technical Considerations and Lessons Learned, *J Laparoendosc Adv Surg Tech A.* 26 (2016) 75–78. <https://doi.org/10.1089/lap.2015.0131>.
- [38] M. Talbot, E.J. Harvey, G.K. Berry, R. Reindl, H. Tien, D.J. Stinner, G. Slobogean, Compartment Release in Austere Locations (CORAL) Collaborators, A pilot study of surgical telementoring for leg fasciotomy, *J R Army Med Corps.* 164 (2018) 83–86. <https://doi.org/10.1136/jramc-2017-000817>.
- [39] V. Sen, O. Aydogdu, T. Yonguc, I.H. Bozkurt, D. Bolat, Telerounding & telementoring for urological procedures, 1. 88 (2016) 206–207. <https://doi.org/10.4081/aiua.2016.3.206>.
- [40] A.A. Gosman, C.A. Fischer, Z. Agha, A. Sigler, J.J. Chao, M.K. Dobke, Telemedicine and Surgical Education Across Borders: A Case Report, *Journal of Surgical Education.* 66 (2009) 102–105. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2008.11.002>.
- [41] T.N. Chao, A.S. Frost, R.M. Brody, Y.M. Byrnes, S.B. Cannady, N.N. Luu, K. Rajasekaran, R.M. Shanti, K.R. Silberthau, V. Triantafillou, J.G. Newman, Creation of an Interactive Virtual Surgical Rotation for Undergraduate Medical Education During the COVID-19 Pandemic, *J Surg Educ.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2020.06.039>.
- [42] D. Mitsuno, Y. Hirota, J. Akamatsu, H. Kino, T. Okamoto, K. Ueda, Telementoring Demonstration in Craniofacial Surgery With HoloLens, Skype, and Three-Layer Facial Models, *J Craniofac Surg.* 30 (2019) 28–32. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000004899>.
- [43] R. Mariño, A. Ghanim, Teledentistry: a systematic review of the literature, *J Telemed Telecare.* 19 (2013) 179–183. <https://doi.org/10.1177/1357633x13479704>.
- [44] J.T. Lichtenstein, A.N. Zeller, J. Lemound, T.E. Lichtenstein, M. Rana, N.-C. Gellrich, M.E. Wagner, 3D-Printed Simulation Device for Orbital Surgery, *J Surg Educ.* 74 (2017) 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2016.07.005>.

- [45] Y. Nguyen, E. Mabelle, D. De Seta, O. Sterkers, D. Bernardeschi, R. Torres, Modifications to a 3D-printed temporal bone model for augmented stapes fixation surgery teaching, *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 274 (2017) 2733–2739. <https://doi.org/10.1007/s00405-017-4572-1>.
- [46] T.D. Crafts, S.E. Ellsperman, T.J. Wannemuehler, T.D. Bellicchi, T.Z. Shipchandler, A.V. Mantravadi, Three-Dimensional Printing and Its Applications in Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, *Otolaryngol Head Neck Surg.* 156 (2017) 999–1010. <https://doi.org/10.1177/0194599816678372>.
- [47] M. Reymus, C. Fotiadou, A. Kessler, K. Heck, R. Hickel, C. Diegritz, 3D printed replicas for endodontic education, *Int Endod J.* 52 (2019) 123–130. <https://doi.org/10.1111/iej.12964>.
- [48] T. Yamada, M. Osako, T. Uchimuro, R. Yoon, T. Morikawa, M. Sugimoto, H. Suda, H. Shimizu, Three-Dimensional Printing of Life-Like Models for Simulation and Training of Minimally Invasive Cardiac Surgery, *Innovations (Phila).* 12 (2017) 459–465. <https://doi.org/10.1097/IMI.0000000000000423>.
- [49] A.S. Alrasheed, L.H.P. Nguyen, L. Mongeau, W.R.J. Funnell, M.A. Tewfik, Development and validation of a 3D-printed model of the ostiomeatal complex and frontal sinus for endoscopic sinus surgery training, *Int Forum Allergy Rhinol.* 7 (2017) 837–841. <https://doi.org/10.1002/alr.21960>.
- [50] Y. Liu, Q. Gao, S. Du, Z. Chen, J. Fu, B. Chen, Z. Liu, Y. He, Fabrication of cerebral aneurysm simulator with a desktop 3D printer, *Sci Rep.* 7 (2017) 44301. <https://doi.org/10.1038/srep44301>.
- [51] D.C. Lobb, P. Cottler, D. Dart, J.S. Black, The Use of Patient-Specific Three-Dimensional Printed Surgical Models Enhances Plastic Surgery Resident Education in Craniofacial Surgery, *J Craniofac Surg.* 30 (2019) 339–341. <https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000005322>.
- [52] A. Williams, M. McWilliam, J. Ahlin, J. Davidson, M.A. Quantz, A. Bütter, A simulated training model for laparoscopic pyloromyotomy: Is 3D printing the way of the future?, *J. Pediatr. Surg.* 53 (2018) 937–941. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2018.02.016>.
- [53] E. Ghizoni, J.P.S.A.S. de Souza, C.E. Raposo-Amaral, R. Denadai, H.B. de Aquino, C.A. Raposo-Amaral, A.F. Joaquim, H. Tedeschi, L.F. Bernardes, A.L. Jardini, 3D-Printed Craniosynostosis Model: New Simulation Surgical Tool, *World Neurosurg.* 109 (2018) 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.10.025>.
- [54] B. Garg, N. Mehta, Current status of 3D printing in spine surgery, *J Clin Orthop Trauma.* 9 (2018) 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.08.006>.
- [55] S.R. Barber, E.D. Kozin, M. Dedmon, B.M. Lin, K. Lee, S. Sinha, N. Black, A.K. Remenschneider, D.J. Lee, 3D-printed pediatric endoscopic ear surgery simulator for surgical training, *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 90 (2016) 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2016.08.027>.

- [56] R. Yao, G. Xu, S.-S. Mao, H.-Y. Yang, X.-T. Sang, W. Sun, Y.-L. Mao, Three-dimensional printing: review of application in medicine and hepatic surgery, *Cancer Biol Med.* 13 (2016) 443–451. <https://doi.org/10.20892/j.issn.2095-3941.2016.0075>.
- [57] S.R. Barber, S. Jain, Y.-J. Son, E.H. Chang, Virtual Functional Endoscopic Sinus Surgery Simulation with 3D-Printed Models for Mixed-Reality Nasal Endoscopy, *Otolaryngol Head Neck Surg.* 159 (2018) 933–937. <https://doi.org/10.1177/0194599818797586>.
- [58] L.B. Seifert, B. Schnurr, C. Herrera-Vizcaino, A. Begic, F. Thieringer, F. Schwarz, R. Sader, 3D-printed patient individualised models vs cadaveric models in an undergraduate oral and maxillofacial surgery curriculum: Comparison of student’s perceptions, *Eur J Dent Educ.* (2020). <https://doi.org/10.1111/eje.12522>.
- [59] C.J. Hong, A.A. Giannopoulos, B.Y. Hong, I.J. Witterick, J.C. Irish, J. Lee, A. Vescan, D. Mitsouras, W. Dang, P. Campisi, J.R. de Almeida, E. Monteiro, Clinical applications of three-dimensional printing in otolaryngology-head and neck surgery: A systematic review, *Laryngoscope.* 129 (2019) 2045–2052. <https://doi.org/10.1002/lary.27831>.
- [60] T.-Y. Hsieh, R. Dedhia, B. Cervenka, T.T. Tollefson, 3D Printing: current use in facial plastic and reconstructive surgery, *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg.* 25 (2017) 291–299. <https://doi.org/10.1097/MOO.0000000000000373>.
- [61] J.-P. Zheng, C.-Z. Li, G.-Q. Chen, G.-D. Song, Y.-Z. Zhang, Three-Dimensional Printed Skull Base Simulation for Transnasal Endoscopic Surgical Training, *World Neurosurg.* 111 (2018) e773–e782. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.12.169>.
- [62] M. Meglioli, A. Naveau, G.M. Macaluso, S. Catros, 3D printed bone models in oral and cranio-maxillofacial surgery: a systematic review, *3D Print Med.* 6 (2020) 30. <https://doi.org/10.1186/s41205-020-00082-5>.
- [63] H. Bertin, J.-F. Huon, M. Praud, F. Fauvel, J.-M. Salagnac, J.-P. Perrin, J.-M. Mercier, P. Corre, Bilateral sagittal split osteotomy training on mandibular 3-dimensional printed models for maxillofacial surgical residents, *Br J Oral Maxillofac Surg.* 58 (2020) 953–958. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2020.04.039>.
- [64] Z.G. Schwam, M.T. Chang, M.A. Barnes, B. Paskhover, Applications of 3-Dimensional Printing in Facial Plastic Surgery, *J. Oral Maxillofac. Surg.* 74 (2016) 427–428. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2015.10.016>.
- [65] M.K. Powers, B.R. Lee, J. Silberstein, Three-dimensional printing of surgical anatomy, *Curr Opin Urol.* 26 (2016) 283–288. <https://doi.org/10.1097/MOU.0000000000000274>.

- [66] B. Langridge, S. Momin, B. Coumbe, E. Woin, M. Griffin, P. Butler, Systematic Review of the Use of 3-Dimensional Printing in Surgical Teaching and Assessment, *J Surg Educ.* 75 (2018) 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2017.06.033>.
- [67] M. Hanisch, E. Kroeger, M. Dekiff, M. Timme, J. Kleinheinz, D. Dirksen, 3D-printed Surgical Training Model Based on Real Patient Situations for Dental Education, *Int J Environ Res Public Health.* 17 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17082901>.
- [68] R. Nicot, C. Druelle, M. Schlund, T. Roland-Billecart, R. Gwénaél, J. Ferri, D. Gosset, Use of 3D printed models in student education of craniofacial traumas, *Dent Traumatol.* 35 (2019) 296–299. <https://doi.org/10.1111/edt.12479>.
- [69] A. Ganguli, G.J. Pagan-Diaz, L. Grant, C. Cvetkovic, M. Bramlet, J. Vozenilek, T. Kesavadas, R. Bashir, 3D printing for preoperative planning and surgical training: a review, *Biomed Microdevices.* 20 (2018) 65. <https://doi.org/10.1007/s10544-018-0301-9>.
- [70] L. Ganry, B. Hersant, R. Bosc, P. Leyder, J. Quilichini, J.P. Meningaud, Study of medical education in 3D surgical modeling by surgeons with free open-source software: Example of mandibular reconstruction with fibula free flap and creation of its surgical guides, *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 119 (2018) 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2018.02.012>.
- [71] S.M. Werz, S.J. Zeichner, B.-I. Berg, H.-F. Zeilhofer, F. Thieringer, 3D Printed Surgical Simulation Models as educational tool by maxillofacial surgeons, *Eur J Dent Educ.* 22 (2018) e500–e505. <https://doi.org/10.1111/eje.12332>.
- [72] A. Li, R. Tang, Z. Rong, J. Zeng, C. Xiang, L. Yu, W. Zhao, J. Dong, The Use of Three-Dimensional Printing Model in the Training of Choledochoscopy Techniques, *World J Surg.* 42 (2018) 4033–4038. <https://doi.org/10.1007/s00268-018-4731-6>.
- [73] C.C. Ploch, C.S.S.A. Mansi, J. Jayamohan, E. Kuhl, Using 3D Printing to Create Personalized Brain Models for Neurosurgical Training and Preoperative Planning, *World Neurosurg.* 90 (2016) 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.02.081>.
- [74] T. Yang, S. Lin, T. Tan, J. Yang, J. Pan, C. Hu, J. Li, Y. Zou, Impact of 3D Printing Technology on Comprehension of Surgical Anatomy of Retroperitoneal Tumor, *World J Surg.* 42 (2018) 2339–2343. <https://doi.org/10.1007/s00268-018-4489-x>.
- [75] S.R. Barber, E.D. Kozin, M.R. Naunheim, R. Sethi, A.K. Remenschneider, D.G. Deschler, 3D-printed tracheoesophageal puncture and prosthesis placement simulator, *Am J Otolaryngol.* 39 (2018) 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2017.08.001>.
- [76] L. Wang, X. Ye, Q. Hao, L. Ma, X. Chen, H. Wang, Y. Zhao, Three-dimensional intracranial middle cerebral artery aneurysm models for aneurysm surgery and training, *J Clin Neurosci.* 50 (2018) 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2018.01.074>.

- [77] S.A. Chen, C.S. Ong, N. Malguria, L.A. Vricella, J.R. Garcia, N. Hibino, Digital Design and 3D Printing of Aortic Arch Reconstruction in HLHS for Surgical Simulation and Training, *World J Pediatr Congenit Heart Surg.* 9 (2018) 454–458. <https://doi.org/10.1177/2150135118771323>.
- [78] A. Hornung, M. Kumpf, W. Baden, I. Tsiflikas, M. Hofbeck, L. Sieverding, Realistic 3D-Printed Tracheobronchial Tree Model from a 1-Year-Old Girl for Pediatric Bronchoscopy Training, *Respiration.* 93 (2017) 293–295. <https://doi.org/10.1159/000459631>.
- [79] K.K. VanKoeveering, K.M. Malloy, Emerging Role of Three-Dimensional Printing in Simulation in Otolaryngology, *Otolaryngol. Clin. North Am.* 50 (2017) 947–958. <https://doi.org/10.1016/j.otc.2017.05.006>.
- [80] C.J. Yao, J. Chow, W.W.S. Choi, N. Mattheos, Measuring the impact of simulation practice on the spatial representation ability of dentists by means of Impacted Mandibular Third Molar (IMTM) Surgery on 3D printed models, *Eur J Dent Educ.* 23 (2019) 332–343. <https://doi.org/10.1111/eje.12434>.
- [81] S.G. Maliha, J.R. Diaz-Siso, N.M. Plana, A. Torroni, R.L. Flores, Haptic, Physical, and Web-Based Simulators: Are They Underused in Maxillofacial Surgery Training?, *J. Oral Maxillofac. Surg.* 76 (2018) 2424.e1-2424.e11. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2018.06.177>.
- [82] J.C. Lane, J.S. Black, Modeling Medical Education: The Impact of Three-Dimensional Printed Models on Medical Student Education in Plastic Surgery, *J Craniofac Surg.* 31 (2020) 1018–1021. <https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000006567>.
- [83] G. Coelho, N.N. Rabelo, E. Vieira, K. Mendes, G. Zagatto, R. Santos de Oliveira, C.E. Raposo-Amaral, M. Yoshida, M.R. de Souza, C.F. Fagundes, M.J. Teixeira, E.G. Figueiredo, Augmented reality and physical hybrid model simulation for preoperative planning of metopic craniosynostosis surgery, *Neurosurg Focus.* 48 (2020) E19. <https://doi.org/10.3171/2019.12.FOCUS19854>.
- [84] Y. Zheng, B. Lu, J. Zhang, G. Wu, CAD/CAM silicone simulator for teaching cheiloplasty: description of the technique, *Br J Oral Maxillofac Surg.* 53 (2015) 194–196. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2014.10.001>.
- [85] Y.K. Chae, H. Lee, M.K. Jih, H.-S. Lee, J.-W. Lee, S.-H. Kim, G.-T. Kim, S.C. Choi, O.H. Nam, Validation of a three-dimensional printed model for training of surgical extraction of supernumerary teeth, *Eur J Dent Educ.* (2020). <https://doi.org/10.1111/eje.12543>.
- [86] S.J. Langenfeld, D.J. Vargo, P.J. Schenarts, Balancing Privacy and Professionalism: A Survey of General Surgery Program Directors on Social Media and Surgical Education, *J Surg Educ.* 73 (2016) e28–e32. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2016.07.010>.
- [87] D.M. Ferguson, L.S. Kao, Getting Started: A Social Media Primer, *Clin Colon Rectal Surg.* 30 (2017) 227–232. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1604249>.

- [88] S. Ovaere, D.D.E. Zimmerman, R.R. Brady, Social Media in Surgical Training: Opportunities and Risks, *J Surg Educ.* 75 (2018) 1423–1429. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2018.04.004>.
- [89] M.R. Ralston, S. O’Neill, S.J. Wigmore, E.M. Harrison, An exploration of the use of social media by surgical colleges, *Int J Surg.* 12 (2014) 1420–1427. <https://doi.org/10.1016/j.ijisu.2014.10.035>.
- [90] S. Bhola, P. Hellyer, The risks and benefits of social media in dental foundation training, *Br Dent J.* 221 (2016) 609–613. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2016.854>.
- [91] V.C. Nikolian, M. Barrett, V.S. Valbuena, A.M. Ibrahim, H. Eidy, M.H. Ghandour, A.A. Ghaferi, Educational content and the use of social media at US departments of surgery, *Surgery.* 163 (2018) 467–471. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2017.10.039>.
- [92] B.N. Reames, K.H. Sheetz, M.J. Englesbe, S.A. Waits, Evaluating the Use of Twitter to Enhance the Educational Experience of a Medical School Surgery Clerkship, *J Surg Educ.* 73 (2016) 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2015.08.005>.
- [93] H.J. Logghe, L.V. Selby, M.A. Boeck, N.L. Stamp, J. Chuen, C. Jones, The academic tweet: Twitter as a tool to advance academic surgery, *J. Surg. Res.* 226 (2018) viii–xii. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.03.049>.
- [94] C.G. Myers, O.Y. Kudsı, A.A. Ghaferi, Social Media as a Platform for Surgical Learning: Use and Engagement Patterns Among Robotic Surgeons, *Ann. Surg.* 267 (2018) 233–235. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002479>.
- [95] A.M. Petrucci, M. Chand, S.D. Wexner, Social Media: Changing the Paradigm for Surgical Education, *Clin Colon Rectal Surg.* 30 (2017) 244–251. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1604252>.
- [96] L.C. Lamb, M.M. DiFiori, V. Jayaraman, B.D. Shames, J.M. Feeney, Gamified Twitter Microblogging to Support Resident Preparation for the American Board of Surgery In-Service Training Examination, *J Surg Educ.* 74 (2017) 986–991. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2017.05.010>.
- [97] J.D. Rouch, J.P. Wagner, A. Scott, V.F. Sullins, D.C. Chen, D.A. DeUgarte, S.B. Shew, A. Tillou, J.C.Y. Dunn, S.L. Lee, Innovation in Pediatric Surgical Education for General Surgery Residents: A Mobile Web Resource, *J Surg Educ.* 72 (2015) 1190–1194. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2015.06.025>.
- [98] C. Chen, L. White, T. Kowalewski, R. Aggarwal, C. Lintott, B. Comstock, K. Kuksenok, C. Aragon, D. Holst, T. Lendvay, Crowd-Sourced Assessment of Technical Skills: a novel method to

- evaluate surgical performance, *J. Surg. Res.* 187 (2014) 65–71.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2013.09.024>.
- [99] B. O’Kelly, S. McHugh, T. McHugh, N. Fady, E. Boyle, A.D.K. Hill, Using Social Media to Increase Accessibility to Online Teaching Resources, *Ir Med J.* 108 (2015) 249.
- [100] M.E.J. Reinders, P.G.M. de Jong, Innovating clinical kidney transplant education by a massive open online course, *Transpl. Immunol.* 38 (2016) 1–2.
<https://doi.org/10.1016/j.trim.2016.06.003>.
- [101] F. Zhao, Y. Fu, Q.-J. Zhang, Y. Zhou, P.-F. Ge, H.-X. Huang, Y. He, The comparison of teaching efficiency between massive open online courses and traditional courses in medicine education: a systematic review and meta-analysis, *Ann Transl Med.* 6 (2018) 458.
<https://doi.org/10.21037/atm.2018.11.32>.
- [102] A. Morice, E. Jablon, C. Delevaque, R. Hossein Khonsari, A. Picard, N. Kadlub, Virtual versus traditional classroom on facial traumatology learning: Evaluation of medical student’s knowledge acquisition and satisfaction, *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.jormas.2020.03.001>.
- [103] M. Jacquemart, P. Bouletreau, P. Breton, A. Mojallal, N. Sigaux, Teaching Surgical Procedures with Movies: Tips for High-quality Video Clips, *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 4 (2016) e1025.
<https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000001025>.
- [104] K.A. Fehring, I. De Martino, A.S. McLawhorn, P.K. Sculco, Social media: physicians-to-physicians education and communication, *Curr Rev Musculoskelet Med.* 10 (2017) 275–277.
<https://doi.org/10.1007/s12178-017-9411-x>.
- [105] P. Saxena, S.K. Gupta, D. Mehrotra, S. Kamthan, H. Sabir, P. Katiyar, S.V. Sai Prasad, Assessment of digital literacy and use of smart phones among Central Indian dental students, *J Oral Biol Craniofac Res.* 8 (2018) 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2017.10.001>.
- [106] M. Dungarwalla, D. Chapiroau, R. Bentley, Use of WhatsApp in an oral and maxillofacial surgery department at a major trauma centre and its role during major incidents: our experience, *Br J Oral Maxillofac Surg.* 57 (2019) 449–453.
<https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2018.11.024>.
- [107] S. Seewoonarain, M. Barrett, The technological evolution in surgical skills, *Clin Teach.* 14 (2017) 370–371. <https://doi.org/10.1111/tct.12643>.
- [108] M. Graafland, M.F. Vollebergh, S.M. Lagarde, M. van Haperen, W.A. Bemelman, M.P. Schijven, A serious game can be a valid method to train clinical decision-making in surgery, *World J Surg.* 38 (2014) 3056–3062. <https://doi.org/10.1007/s00268-014-2743-4>.

- [109] K.M. Amer, T. Mur, K. Amer, A.M. Ilyas, A Mobile-Based Surgical Simulation Application: A Comparative Analysis of Efficacy Using a Carpal Tunnel Release Module, *J Hand Surg Am.* 42 (2017) 389.e1-389.e9. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2017.02.008>.
- [110] J. Qin, Y.-P. Chui, W.-M. Pang, K.-S. Choi, P.-A. Heng, Learning blood management in orthopedic surgery through gameplay, *IEEE Comput Graph Appl.* 30 (2010) 45–57. <https://doi.org/10.1109/MCG.2009.83>.
- [111] R. Shewaga, A. Knox, G. Ng, B. Kapralos, A. Dubrowski, Z-DOC: a serious game for Z-plasty procedure training, *Stud Health Technol Inform.* 184 (2013) 404–406.
- [112] M. Graafland, W.A. Bemelman, M.P. Schijven, Game-based training improves the surgeon's situational awareness in the operation room: a randomized controlled trial, *Surg Endosc.* 31 (2017) 4093–4101. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5456-6>.
- [113] K.-F. Kowalewski, J.D. Hendrie, M.W. Schmidt, T. Proctor, S. Paul, C.R. Garrow, H.G. Kenngott, B.P. Müller-Stich, F. Nickel, Validation of the mobile serious game application Touch Surgery™ for cognitive training and assessment of laparoscopic cholecystectomy, *Surg Endosc.* 31 (2017) 4058–4066. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5452-x>.
- [114] D.B. Clarke, N. Kureshi, M. Hong, M. Sadeghi, R.C.N. D'Arcy, Simulation-based training for burr hole surgery instrument recognition, *BMC Med Educ.* 16 (2016) 153. <https://doi.org/10.1186/s12909-016-0669-2>.
- [115] S.-H. Chon, F. Timmermann, T. Dratsch, N. Schuelper, P. Plum, F. Berlth, R.R. Datta, C. Schramm, S. Haneder, M.R. Späth, M. Dübbers, J. Kleinert, T. Raupach, C. Bruns, R. Kleinert, Serious Games in Surgical Medical Education: A Virtual Emergency Department as a Tool for Teaching Clinical Reasoning to Medical Students, *JMIR Serious Games.* 7 (2019) e13028. <https://doi.org/10.2196/13028>.
- [116] R. Kleinert, P. Plum, N. Heiermann, R. Wahba, D.-H. Chang, A.H. Hölscher, D.L. Stippel, Embedding a Virtual Patient Simulator in an Interactive Surgical lecture, *J Surg Educ.* 73 (2016) 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2015.11.006>.
- [117] R. Kleinert, N. Heiermann, R. Wahba, D.-H. Chang, A.H. Hölscher, D.L. Stippel, Design, Realization, and First Validation of an Immersive Web-Based Virtual Patient Simulator for Training Clinical Decisions in Surgery, *J Surg Educ.* 72 (2015) 1131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2015.05.009>.
- [118] S. Samra, A. Wu, M. Redleaf, Interactive iPhone/iPad App for Increased Tympanic Membrane Familiarity, *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 125 (2016) 997–1000. <https://doi.org/10.1177/0003489416669952>.
- [119] R.D. Bartlett, D. Radenkovic, S. Mitrasinovic, A. Cole, I. Pavkovic, P.C.P. Denn, M. Hussain, M. Kogler, N. Koutsopodioti, W. Uddin, I. Beckley, H. Abubakar, D. Gill, D. Smith, A pilot study to

- assess the utility of a freely downloadable mobile application simulator for undergraduate clinical skills training: a single-blinded, randomised controlled trial, *BMC Med Educ.* 17 (2017) 247. <https://doi.org/10.1186/s12909-017-1085-y>.
- [120] Z.E. Brewer, W.D. Ogden, J.I. Fann, T.A. Burdon, A.Y. Sheikh, Creation and Global Deployment of a Mobile, Application-Based Cognitive Simulator for Cardiac Surgical Procedures, *Semin. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 28 (2016) 1–9. <https://doi.org/10.1053/j.semtcvs.2016.02.006>.
- [121] G.J. Bunogerane, K. Taylor, Y. Lin, A. Costas-Chavarri, Using Touch Surgery to Improve Surgical Education in Low- and Middle-Income Settings: A Randomized Control Trial, *J Surg Educ.* 75 (2018) 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2017.06.016>.
- [122] A.E. Kinio, L. Dufresne, T. Brandys, P. Jetty, Break out of the Classroom: The Use of Escape Rooms as an Alternative Teaching Strategy in Surgical Education, *J Surg Educ.* 76 (2019) 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2018.06.030>.
- [123] Y. Pulijala, M. Ma, M. Pears, D. Peebles, A. Ayoub, Effectiveness of Immersive Virtual Reality in Surgical Training-A Randomized Control Trial, *J. Oral Maxillofac. Surg.* 76 (2018) 1065–1072. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2017.10.002>.
- [124] A. Alaraj, C.J. Luciano, D.P. Bailey, A. Elsenousi, B.Z. Roitberg, A. Bernardo, P.P. Banerjee, F.T. Charbel, Virtual reality cerebral aneurysm clipping simulation with real-time haptic feedback, *Neurosurgery.* 11 Suppl 2 (2015) 52–58. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000583>.
- [125] A. Alaraj, F.T. Charbel, D. Birk, M. Tobin, M. Tobin, C. Luciano, P.P. Banerjee, S. Rizzi, J. Sorenson, K. Foley, K. Slavin, B. Roitberg, Role of cranial and spinal virtual and augmented reality simulation using immersive touch modules in neurosurgical training, *Neurosurgery.* 72 Suppl 1 (2013) 115–123. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182753093>.
- [126] R.J. Duarte, J. Cury, L.C.N. Oliveira, M. Srougi, Establishing the minimal number of virtual reality simulator training sessions necessary to develop basic laparoscopic skills competence: evaluation of the learning curve, *Int Braz J Urol.* 39 (2013) 712–719. <https://doi.org/10.1590/S1677-5538.IBJU.2013.05.14>.
- [127] R.E. Sofronia, T. Knott, A. Davidescu, G.G. Savii, T. Kuhlen, M. Gerressen, Failure mode and effects analysis in designing a virtual reality-based training simulator for bilateral sagittal split osteotomy, *Int J Med Robot.* 9 (2013) e1-9. <https://doi.org/10.1002/rcs.1483>.
- [128] N. Ahmed, I.H. McVicar, D.A. Mitchell, Simulation-based training in maxillofacial surgery: are we going to be left behind?, *Br J Oral Maxillofac Surg.* 57 (2019) 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2018.11.009>.
- [129] T. Mazur, T.R. Mansour, L. Mugge, A. Medhkour, Virtual Reality-Based Simulators for Cranial Tumor Surgery: A Systematic Review, *World Neurosurg.* 110 (2018) 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.11.132>.

- [130] X. Chen, J. Hu, A review of haptic simulator for oral and maxillofacial surgery based on virtual reality, *Expert Rev Med Devices*. 15 (2018) 435–444. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1484727>.
- [131] R.A. Agha, A.J. Fowler, The role and validity of surgical simulation, *Int Surg*. 100 (2015) 350–357. <https://doi.org/10.9738/INTSURG-D-14-00004.1>.
- [132] F. Wu, X. Chen, Y. Lin, C. Wang, X. Wang, G. Shen, J. Qin, P.-A. Heng, A virtual training system for maxillofacial surgery using advanced haptic feedback and immersive workbench, *Int J Med Robot*. 10 (2014) 78–87. <https://doi.org/10.1002/rcs.1514>.
- [133] A.R. Cohen, S. Lohani, S. Manjila, S. Natsupakpong, N. Brown, M.C. Cavusoglu, Virtual reality simulation: basic concepts and use in endoscopic neurosurgery training, *Childs Nerv Syst*. 29 (2013) 1235–1244. <https://doi.org/10.1007/s00381-013-2139-z>.
- [134] I. Ioannou, E. Kazmierczak, L. Stern, Comparison of oral surgery task performance in a virtual reality surgical simulator and an animal model using objective measures, *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2015 (2015) 5114–5117. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319542>.
- [135] P. Pohlenz, A. Gröbe, A. Petersik, N. von Sternberg, B. Pflesser, A. Pommert, K.-H. Höhne, U. Tiede, I. Springer, M. Heiland, Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school, *J Craniomaxillofac Surg*. 38 (2010) 560–564. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2010.02.011>.
- [136] G. Rosseau, J. Bailes, R. del Maestro, A. Cabral, N. Choudhury, O. Comas, P. Debergue, G. De Luca, J. Hovdebo, D. Jiang, D. Laroche, A. Neubauer, V. Pazos, F. Thibault, R. Diraddo, The development of a virtual simulator for training neurosurgeons to perform and perfect endoscopic endonasal transsphenoidal surgery, *Neurosurgery*. 73 Suppl 1 (2013) 85–93. <https://doi.org/10.1227/NEU.000000000000112>.
- [137] N. von Sternberg, M.S. Bartsch, A. Petersik, J. Wiltfang, W. Sibbersen, T. Grindel, U. Tiede, P.H. Warnke, M. Heiland, P. a. J. Russo, H. Terheyden, P. Pohlenz, I.N. Springer, Learning by doing virtually, *Int J Oral Maxillofac Surg*. 36 (2007) 386–390. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2006.12.016>.
- [138] J.G. Frederiksen, S.M.D. Sørensen, L. Konge, M.B.S. Svendsen, M. Nobel-Jørgensen, F. Bjerrum, S.A.W. Andersen, Cognitive load and performance in immersive virtual reality versus conventional virtual reality simulation training of laparoscopic surgery: a randomized trial, *Surg Endosc*. (2019). <https://doi.org/10.1007/s00464-019-06887-8>.
- [139] N. Rudarakanthana, I. Van Herzeele, C.D. Bicknell, C.V. Riga, A. Rolls, N.J.W. Cheshire, M.S. Hamady, Endovascular repair of ruptured abdominal aortic aneurysm: technical and team training in an immersive virtual reality environment, *Cardiovasc Intervent Radiol*. 37 (2014) 920–927. <https://doi.org/10.1007/s00270-013-0765-1>.

- [140] T. Huber, M. Paschold, C. Hansen, T. Wunderling, H. Lang, W. Kneist, New dimensions in surgical training: immersive virtual reality laparoscopic simulation exhilarates surgical staff, *Surg Endosc.* 31 (2017) 4472–4477. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5500-6>.
- [141] V.S. Arikatla, M. Tyagi, A. Enquobahrie, T. Nguyen, G.H. Blakey, R. White, B. Paniagua, High Fidelity Virtual Reality Orthognathic Surgery Simulator, *Proc SPIE Int Soc Opt Eng.* 10576 (2018). <https://doi.org/10.1117/12.2293690>.
- [142] T. Miki, T. Iwai, K. Kotani, J. Dang, H. Sawada, M. Miyake, Development of a virtual reality training system for endoscope-assisted submandibular gland removal, *J Craniomaxillofac Surg.* 44 (2016) 1800–1805. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.08.018>.
- [143] C.M. Harrington, V. Chaitanya, P. Dicker, O. Traynor, D.O. Kavanagh, Playing to your skills: a randomised controlled trial evaluating a dedicated video game for minimally invasive surgery, *Surg Endosc.* 32 (2018) 3813–3821. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6107-2>.
- [144] X. Chen, P. Sun, D. Liao, A patient-specific haptic drilling simulator based on virtual reality for dental implant surgery, *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 13 (2018) 1861–1870. <https://doi.org/10.1007/s11548-018-1845-0>.
- [145] A. Plessas, Computerized Virtual Reality Simulation in Preclinical Dentistry: Can a Computerized Simulator Replace the Conventional Phantom Heads and Human Instruction?, *Simul Healthc.* 12 (2017) 332–338. <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000250>.
- [146] E. Jean Dit Gautier, V. Bot-Robin, A. Libessart, G. Doucède, M. Cosson, C. Rubod, Design of a Serious Game for Handling Obstetrical Emergencies, *JMIR Serious Games.* 4 (2016) e21. <https://doi.org/10.2196/games.5526>.
- [147] E. Wierinck, V. Puttemans, S. Swinnen, D. van Steenberghe, Effect of augmented visual feedback from a virtual reality simulation system on manual dexterity training, *Eur J Dent Educ.* 9 (2005) 10–16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0579.2004.00351.x>.
- [148] Y. Pulijala, M. Ma, M. Pears, D. Peebles, A. Ayoub, An innovative virtual reality training tool for orthognathic surgery, *Int J Oral Maxillofac Surg.* 47 (2018) 1199–1205. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2018.01.005>.
- [149] R. Javan, A. Rao, B.S. Jeun, A. Herur-Raman, N. Singh, P. Heidari, From CT to 3D Printed Models, Serious Gaming, and Virtual Reality: Framework for Educational 3D Visualization of Complex Anatomical Spaces From Within-the Pterygopalatine Fossa, *J Digit Imaging.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s10278-019-00315-y>.

AUTEUR : Nom : GRALL

Prénom : Patrick

Date de soutenance : 02 Avril 2021

Titre de la thèse : « Surgical Training 2.0 » : Une approche systématique passant en revue la littérature axée sur la chirurgie orale et maxillo-faciale

Thèse - Médecine - Lille « 2021 »

Cadre de classement : Formation chirurgicale

DES + spécialité : Chirurgie maxillo-faciale

Mots-clés : Open Field Camera, Télémedecine, Impression 3D, Réseaux sociaux, Serious Games, Réalité Virtuelle, Chirurgie, Education, Chirurgie maxillo-faciale

Méthode : Cet article est une approche systématique qui passe en revue les nouvelles technologies en matière de formation chirurgicale, en particulier en chirurgie orale et maxillofaciale. Cet article explore ce que les nouvelles technologies peuvent apporter par rapport aux méthodes traditionnelles dans le domaine de l'éducation chirurgicale. Une recherche structurée de la littérature sur PubMed a été exécutée dans le respect des directives PRISMA. Les articles ont été sélectionnés lorsqu'ils réunissaient les critères d'inclusion prédéfinis, tout en respectant les principaux objectifs de cette revue systématique. Nous avons étudié si l'exposition aux nouvelles technologies des étudiants en médecine, et plus particulièrement de chirurgie, améliorerait leurs compétences chirurgicales par rapport aux méthodes traditionnelles. Chaque technologie est passée au crible en étudiant ses avantages et inconvénients et en envisageant son intégration dans la pratique quotidienne.

Résultats : Les résultats sont encourageants. En effet, toutes ces technologies permettent de réduire les courbes d'apprentissage, les durées opératoires, les complications per-opératoires et déclenchent un bel enthousiasme chez les étudiants par rapport aux méthodes plus conventionnelles. Les coûts de développement, la complexité logistique et technique et l'ouverture d'esprit nécessaire sont autant d'obstacles au développement immédiat de ces nouvelles technologies. Les principales limites à cette revue de la littérature sont que bon nombre des études ont été réalisées sur de petits effectifs, qu'elles n'étudient pas le maintien des compétences et des connaissances à long terme et qu'il y a manifestement un biais de publication.

Conclusion : Les méthodes d'éducation en chirurgie changeront probablement dans les années à venir. L'intégration de ces nouvelles technologies dans le cursus semble essentielle pour ne pas rester à la marge.

Composition du Jury :

Président :

Monsieur le Professeur J. FERRI

Assesseurs :

Monsieur le Professeur P. TRUFFERT

Madame la Professeure C. RUBOD DIT GUILLET

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur R. NICOT