



HAL
open science

Intérêt de la simulation en réalité virtuelle pour l'apprentissage de la mastoïdectomie

Fanny Bense

► **To cite this version:**

Fanny Bense. Intérêt de la simulation en réalité virtuelle pour l'apprentissage de la mastoïdectomie. Médecine humaine et pathologie. 2019. dumas-02376156

HAL Id: dumas-02376156

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02376156v1>

Submitted on 22 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

FACULTE MIXTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

ANNEE 2019

**THESE POUR LE
DOCTORAT EN MEDECINE**

Diplôme d'état

Par

Fanny BENSE

Née le 03/01/1990

Présentée et soutenue publiquement le 20/09/2019

**Intérêt de la simulation en réalité virtuelle
pour l'apprentissage de la mastoïdectomie**

PRESIDENT DU JURY :

Pr Jean-Paul MARIE

DIRECTRICE DE THESE :

Dr Catherine NOWAK

MEMBRES DU JURY :

Pr Jean-François PAPON

Dr Jérôme NEVOUX

Dr Emmanuel DE SEVIN

Dr Pierre-Yves LIENHARDT

ANNEE UNIVERSITAIRE 2018 - 2019

U.F.R. SANTÉ DE ROUEN

DOYEN : **Professeur Pierre FREGER**

ASSESEURS : **Professeur Michel GUERBET**
Professeur Benoit VEBER
Professeur Guillaume SAVOYE

I - MEDECINE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mr Frédéric ANSELME	HCN	Cardiologie
Mme Gisèle APTER	Havre	Pédopsychiatrie
Mme Isabelle AUQUIT AUCKBUR	HCN	Chirurgie plastique
Mr Jean-Marc BASTE	HCN	Chirurgie Thoracique
Mr Fabrice BAUER	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya BEKRI	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Ygal BENHAMOU	HCN	Médecine interne
Mr Jacques BENICHOU	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
Mr Olivier BOYER	UFR	Immunologie
Mme Sophie CANDON	HCN	Immunologie
Mr François CARON	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Philippe CHASSAGNE	HCN	Médecine interne (gériatrie)
Mr Vincent COMPERE	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mr Jean-Nicolas CORNU	HCN	Urologie
Mr Antoine CUVELIER	HB	Pneumologie
Mr Jean-Nicolas DACHER	HCN	Radiologie et imagerie médicale
Mr Stéfan DARMONI	HCN	Informatique médicale et techniques de communication
Mr Pierre DECHELOTTE	HCN	Nutrition
Mr Stéphane DERREY	HCN	Neurochirurgie
Mr Frédéric DI FIORE	CB	Cancérologie

Mme Nathalie DI MARCO	HCN	Emploi fictif de l'Internat
Mr Fabien DOGUET	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
Mr Jean DOUCET	SJ	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
Mr Bernard DUBRAY	CB	Radiothérapie
Mr Frank DUJARDIN	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
Mr Fabrice DUPARC	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mr Eric DURAND	HCN	Cardiologie
Mr Bertrand DUREUIL	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène ELTCHANINOFF	HCN	Cardiologie
Mr Manuel ETIENNE	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Thierry FREBOURG	UFR	Génétique
Mr Pierre FREGER	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
Mr Jean François GEHANNO	HCN	Médecine et santé au travail
Mr Emmanuel GERARDIN	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille GERARDIN	HCN	Pédopsychiatrie
M. Guillaume GOURCEROL	HCN	Physiologie
Mr Dominique GUERROT	HCN	Néphrologie
Mr Olivier GUILLIN	HCN	Psychiatrie Adultes
Mr Didier HANNEQUIN	HCN	Neurologie
Mr Claude HOUDAYER	HCN	Génétique
Mr Fabrice JARDIN	CB	Hématologie
Mr Luc-Marie JOLY	HCN	Médecine d'urgence
Mr Pascal JOLY	HCN	Dermato – Vénérologie
Mme Bouchra LAMIA	Havre	Pneumologie
Mme Annie LAQUERRIERE	HCN	Anatomie et cytologie pathologiques
Mr Vincent LAUDENBACH	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale
Mr Joël LECHEVALLIER	HCN	Chirurgie infantile
Mr Hervé LEFEBVRE	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
Mr Thierry LEQUERRE	HB	Rhumatologie
Mme Anne-Marie LEROI	HCN	Physiologie
Mr Hervé LEVESQUE	HB	Médecine interne
Mme Agnès LIARD-ZMUDA	HCN	Chirurgie Infantile
Mr Pierre Yves LITZLER	HCN	Chirurgie cardiaque
Mr Bertrand MACE	HCN	Histologie, embryologie, cytogénétique
M. David MALTETE	HCN	Neurologie
Mr Christophe MARGUET	HCN	Pédiatrie

Mme Isabelle MARIE	HB	Médecine interne
Mr Jean-Paul MARIE	HCN	Oto-rhino-laryngologie
Mr Loïc MARPEAU	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Stéphane MARRET	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique MERLE	HCN	Epidémiologie
Mr Pierre MICHEL	HCN	Hépatogastro-entérologie
M. Benoit MISSET (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation Médicale Mr Jean-François
MUIR (<i>sumombre</i>)	HB	Pneumologie
Mr Marc MURAINÉ	HCN	Ophtalmologie
Mr Christophe PEILLON	HCN	Chirurgie générale
Mr Christian PFISTER	HCN	Urologie
Mr Jean-Christophe PLANTIER	HCN	Bactériologie - Virologie
Mr Didier PLISSONNIER	HCN	Chirurgie vasculaire
Mr Gaëtan PREVOST	HCN	Endocrinologie
Mr Jean-Christophe RICHARD (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent RICHARD	UFR	Pharmacologie
Mme Nathalie RIVES	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
Mr Horace ROMAN (<i>disponibilité</i>)	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Jean-Christophe SABOURIN	HCN	Anatomie - Pathologie
Mr Guillaume SAVOYE	HCN	Hépatogastrologie
Mme Céline SAVOYE-COLLET	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale SCHNEIDER	HCN	Pédiatrie
Mme Fabienne TAMION	HCN	Thérapeutique
Mr Luc THIBERVILLE	HCN	Pneumologie
Mr Christian THUILLEZ (<i>sumombre</i>)	HB	Pharmacologie
Mr Hervé TILLY	CB	Hématologie et transfusion
M. Gilles TOURNEL	HCN	Médecine Légale
Mr Olivier TROST	HCN	Chirurgie Maxillo-Faciale
Mr Jean-Jacques TUECH	HCN	Chirurgie digestive
Mr Jean-Pierre VANNIER (<i>sumombre</i>)	HCN	Pédiatrie génétique
Mr Benoît VEBER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
Mr Pierre VERA	CB	Biophysique et traitement de l'image
Mr Eric VERIN	HB	Service Santé Réadaptation
Mr Eric VERSPYCK	HCN	Gynécologie obstétrique
Mr Olivier VITTECOQ	HB	Rhumatologie
Mme Marie-Laure WELTER	HCN	Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Noëlle BARBIER-FREBOURG	HCN	Bactériologie – Virologie
Mme Carole BRASSE LAGNEL	HCN	Biochimie
Mme Valérie BRIDOUX HUYBRECHTS	HCN	Chirurgie Vasculaire
Mr Gérard BUCHONNET	HCN	Hématologie
Mme Mireille CASTANET	HCN	Pédiatrie
Mme Nathalie CHASTAN	HCN	Neurophysiologie
Mme Sophie CLAEYSSENS	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Moïse COEFFIER	HCN	Nutrition
Mr Serge JACQUOT	UFR	Immunologie
Mr Joël LADNER	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Baptiste LATOUCHE	UFR	Biologie cellulaire
Mr Thomas MOUREZ (<i>détachement</i>)	HCN	Virologie
Mr Gaël NICOLAS	HCN	Génétique
Mme Muriel QUILLARD	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia ROLLIN	HCN	Médecine du Travail
Mr Mathieu SALAUN	HCN	Pneumologie
Mme Pascale SAUGIER-VEBER	HCN	Génétique
Mme Anne-Claire TOBENAS-DUJARDIN	HCN	Anatomie
Mr David WALLON	HCN	Neurologie
Mr Julien WILS	HCN	Pharmacologie

PROFESSEUR AGREGE OU CERTIFIE

Mr Thierry WABLE	UFR	Communication
Mme Mélanie AUVRAY-HAMEL	UFR	Anglais

II - PHARMACIE

PROFESSEURS

Mr Thierry BESSON	Chimie Thérapeutique
Mr Roland CAPRON (PU-PH)	Biophysique
Mr Jean COSTENTIN (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr François ESTOUR	Chimie Organique
Mr Loïc FAVENNEC (PU-PH)	Parasitologie
Mr Jean Pierre GOULLE (Professeur émérite)	Toxicologie
Mr Michel GUERBET	Toxicologie
Mme Isabelle LEROUX - NICOLLET	Physiologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON (PU-PH)	Microbiologie
Mr Rémi VARIN (PU-PH)	Pharmacie clinique
Mr Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

MAITRES DE CONFERENCES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et Minérale
Mr Jérémy BELLIEN (MCU-PH)	Pharmacologie
Mr Frédéric BOUNOURE	Pharmacie Galénique
Mr Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Camille CHARBONNIER (LE CLEZIO)	Statistiques
Mme Elizabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation pharmaceutique et économie de la santé
Mme Cécile CORBIERE	Biochimie
Mr Eric DITTMAR	Biophysique
Mme Nathalie DOURMAP	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUC	Pharmacologie
Mme Dominique DUTERTE- BOUCHER	Pharmacologie
Mr Abdelhakim ELOMRI	Pharmacognosie

Mr Gilles GARGALA (MCU-PH)	Parasitologie
Mme Nejla EL GHARBI-HAMZA	Chimie analytique
Mme Marie-Laure GROULT	Botanique
Mr Hervé HUE	Biophysique et mathématiques
Mme Laetitia LE GOFF	Parasitologie – Immunologie
Mme Hong LU	Biologie
M. Jérémie MARTINET (MCU-PH)	Immunologie
Mme Marine MALLETER	Toxicologie
Mme Sabine MENAGER	Chimie organique
Mme Tiphaine ROGEZ-FLORENT	Chimie analytique
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Malika SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Christine THARASSE	Chimie thérapeutique
Mr Frédéric ZIEGLER	Biochimie

PROFESSEURS ASSOCIES

Mme Cécile GUERARD-DETUNCQ	Pharmacie officinale
Mr Jean-François HOUVET	Pharmacie officinale

PROFESSEUR CERTIFIE

Mme Mathilde GUERIN	Anglais
----------------------------	---------

ASSISTANT HOSPITALO-UNIVERSITAIRE

Mme Anaïs SOARES	Bactériologie
-------------------------	---------------

ATTACHES TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

Mme Sophie MOHAMED	Chimie Organique
---------------------------	------------------

LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et minérale
Mr Thierry BESSON	Chimie thérapeutique
Mr Roland CAPRON	Biophysique
Mme Marie-Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation et économie de la santé
Mme Elisabeth CHOSSON	Botanique
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Abdelhakim ELOMRI	Pharmacognosie
Mr Loïc FAVENNEC	Parasitologie
Mr Michel GUERBET	Toxicologie
Mr François ESTOUR	Chimie organique
Mme Isabelle LEROUX-NICOLLET	Physiologie
Mme Martine PESTEL-CARON	Microbiologie
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mr Rémi VARIN	Pharmacie clinique
M. Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

III – MEDECINE GENERALE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES MEDECIN GENERALISTE

Mr Jean-Loup **HERMIL** (PU-MG) UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCE DES UNIVERSITES MEDECIN GENERALISTE

Mr Matthieu **SCHUERS** (MCU-MG) UFR Médecine générale

PROFESSEURS ASSOCIES A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTE

Mme Laëtitia **BOURDON** UFR Médecine Générale

Mr Emmanuel **LEFEBVRE** UFR Médecine Générale

Mme Elisabeth **MAUVIARD** UFR Médecine générale

Mr Philippe **NGUYEN THANH** UFR Médecine générale

Mme Marie Thérèse **THUEUX** UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTES

Mr Pascal **BOULET** UFR Médecine générale

Mr Emmanuel **HAZARD** UFR Médecine Générale

Mme Marianne **LAINÉ** UFR Médecine Générale

Mme Lucile **PELLERIN** UFR Médecine générale

Mme Yveline **SEVRIN** UFR Médecine générale

ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

PROFESSEURS

Mr Serguei FETISSOV (med)	Physiologie (ADEN)
Mr Paul MULDER (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su RUAN (med)	Génie Informatique

MAITRES DE CONFERENCES

Mr Sahil ADRIOUCH (med)	Biochimie et biologie moléculaire (Unité Inserm 905)
Mme Gaëlle BOUGEARD-DENOYELLE (med)	Biochimie et biologie moléculaire (UMR 1079)
Mme Carine CLEREN (med)	Neurosciences (Néovasc)
M. Sylvain FRAINEAU (med)	Physiologie (Inserm U 1096)
Mme Pascaline GAILDRAT (med)	Génétique moléculaire humaine (UMR 1079)
Mr Nicolas GUEROUT (med)	Chirurgie Expérimentale
Mme Rachel LETELLIER (med)	Physiologie
Mme Christine RONDANINO (med)	Physiologie de la reproduction
Mr Antoine OUVRARD-PASCAUD (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
Mr Frédéric PASQUET	Sciences du langage, orthophonie
Mr Youssan Var TAN	Immunologie
Mme Isabelle TOURNIER (med)	Biochimie (UMR 1079)

CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS : Mme Véronique DELAFONTAINE

HCN - Hôpital Charles Nicolle

HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME

CB - Centre Henri Becquerel

CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray

CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation

SJ – Saint Julien Rouen

Par délibération en date du 3 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propre à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

Remerciements,

Au Docteur Catherine Nowak, merci mille fois d'avoir accepté de diriger ma thèse, pour ta disponibilité et ton aide dans ce travail. Merci également de m'avoir fait partager ta passion pour l'otologie, pour ta patience au bloc opératoire qui m'a permis de progresser. Et surtout merci pour tous ces moments de discussion dans ton bureau qui te caractérisent !

Au Professeur Jean-Paul Marie, qui me fait l'honneur de présider ma soutenance de thèse. Je vous remercie pour votre soutien dans mes différents projets, et pour votre enseignement tout au long de mon internat rouennais.

Au Professeur Jean-François Papon, merci de m'avoir accueillie dans votre service, où j'ai eu la chance de me former en chirurgie endonasale à vos côtés. Mon semestre à KB a été très enrichissant. Je vous remercie également pour votre bienveillance, pour votre écoute, vos précieux conseils, et bien sûr pour les fameuses visites du vendredi matin.

Au Docteur Jérôme Nevoux, je n'aurais pas pu deviner quand j'étais externe que tu ferais un jour partie de mon jury de thèse, et c'est un honneur pour moi ! Merci pour ta bonne humeur, c'est toujours un plaisir de travailler avec toi.

Au Docteur Emmanuel De Sevin, pour ce super semestre passé au sein de la famille dieppoise. Votre côté humain avec vos patients et collègues est un exemple pour moi, ainsi que votre sens de la pédagogie internationalement connu et reconnu.

Au Docteur Pierre-Yves Lienhardt, pour avoir accompagné mes premiers pas chirurgicaux. Le passionné de chirurgie que vous êtes m'a transmis le goût du bloc opératoire. Je garde un excellent souvenir de mon premier semestre havrais à vos côtés.

Au Professeur Olivier Lambotte, mon tuteur d'externat. Vous êtes resté un de mes plus grands soutiens et une source de motivation durant mon internat. Je vous remercie infiniment de rester disponible pour moi depuis toutes ces années, et de croire en moi.

A tous mes Chefs de service, PH, CCA, Assistants, pour votre enseignement et tous vos précieux conseils.

A toutes les équipes paramédicales rencontrées au cours de ces années d'internat, merci pour votre accueil.

A mes co-internes, pour tous les bons moments passés ensemble, en stage ou en soirée.

A mes amis, d'enfance et d'ailleurs, qui comptent énormément pour moi.

A ma famille, pour m'avoir soutenue et cru en moi toutes ces années. Et en particulier à mes parents pour m'avoir donné le goût du travail.

A Christophe, merci pour tout ce que tu es, pour ton amour, ta complicité, ton grain de folie, tes petites attentions, et ta présence au quotidien. L'avenir avec toi me remplit de bonheur.

Choisis un travail que tu aimes et tu n'auras pas à travailler un seul jour de ta vie.

Confucius

SOMMAIRE

ABRÉVIATIONS	1
INTRODUCTION	2
1. La simulation : définitions	3
1.1 La simulation en santé	3
1.2 La réalité virtuelle.....	3
1.3 Critères de validation d'un outil de simulation	3
1.4 Différents types de simulation en santé	8
2. Histoire de la simulation	10
2.1 Les secteurs pionniers en simulation	10
2.2 La naissance de la simulation en santé	11
3. La simulation pour l'apprentissage de la chirurgie	16
3.1 Place de la simulation pour l'enseignement en chirurgie	16
3.2 Validation et intégration de la simulation pour l'enseignement en chirurgie	17
3.3 Applications de la simulation pour l'enseignement en chirurgie ORL	19
4. Les supports de simulation pour la chirurgie otologique	20
4.1 Rocher de cadavre	21
4.2 Modèles animaux.....	23
4.3 Rocher synthétique	24
4.4 Simulation en réalité virtuelle	27
4.5 Comparaison des supports de simulation pour la chirurgie otologique.....	30
5. Le VOXEL-MAN Tempo®	31
5.1 Histoire.....	31
5.2 Validation.....	31

5.3 Coût.....	33
5.4 Matériel.....	33
5.5 Logiciel.....	35
OBJECTIFS	37
MATÉRIEL ET MÉTHODES	38
1. Population	39
2. Schéma de l'étude	40
2.1 Cours d'anatomie chirurgicale	40
2.2 Simulation en réalité virtuelle	40
2.3 Dissection sur os temporal cadavérique.....	42
3. Critères d'évaluation	43
4. Statistiques	45
RÉSULTATS.....	46
1. Population	47
1.1 Répartition finale de la population	47
1.2 Caractéristiques de la population	48
2. Evaluation lors de la dissection	51
2.1 Echelle d'évaluation de la performance Welling Scale	51
2.2 Echelle d'évaluation de la technique Task-Based Checklist	54
2.3 Autres données relevées lors de la dissection	57
3. Evaluation lors de la simulation virtuelle	58
4. Comparaison dissection et simulation virtuelle	62
DISCUSSION	67
1. Analyse des résultats.....	68
1.1 Objectif principal.....	68
1.2 Objectifs secondaires	69
2. Caractéristiques de la population.....	73

3. Limites de l'étude.....	74
3.1 Population	74
3.2 Protocole de l'étude	75
4. Intérêt du VOXEL-MAN Tempo® pour la formation	76
5. Perspectives	78
5.1 Intégration de la simulation dans le curriculum des internes d'ORL	78
5.2 Validité de transfert du VOXEL-MAN Tempo®	81
CONCLUSION.....	83
BIBLIOGRAPHIE	84
ANNEXES	92
Annexe 1 : Questionnaire pré-formation	93
Annexe 2 : Echelle d'évaluation de la performance Welling Scale	101
Annexe 3 : Echelle d'évaluation de la technique Task-Based Checklist	102
Annexe 4 : Questionnaire post-simulation virtuelle.....	103
Annexe 5 : Questionnaire post-dissection	106

ABRÉVIATIONS

RV : réalité virtuelle

OSATS : Objective Structured Assessment of Technical Skills

ORL : Oto-Rhino-Laryngologie

OT : os temporal

3D : 3 dimensions

INTRODUCTION

1. La simulation : définitions

1.1 La simulation en santé

Un rapport de 2012 de la Haute Autorité de Santé définit le terme simulation en santé comme « l'utilisation d'un matériel (comme un mannequin ou un simulateur procédural), de la réalité virtuelle (RV) ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels » (1).

1.2 La réalité virtuelle

Selon Jean Segura, spécialiste de l'imagerie de synthèse et des usages du virtuel, la réalité virtuelle peut se définir comme « l'ensemble des techniques et systèmes qui procurent à l'homme le sentiment de pénétrer dans des univers synthétiques créés sur internet. La réalité virtuelle donne la possibilité d'effectuer en temps réel un certain nombre d'actions définies par un ou plusieurs programmes informatiques et d'éprouver un certain nombre de sensations visuelles, auditives ou haptiques » (2).

1.3 Critères de validation d'un outil de simulation

L'essor récent de la simulation a été associé à la nécessité d'évaluer les outils de simulation et de les valider. Des critères de validation ont donc été développés afin d'évaluer les outils de simulation. Ces critères de validation ont été adaptés au domaine de la simulation en chirurgie en 2003 par Gallagher et al. Dans cet article, l'auteur s'est inspiré des « standards » utilisés pour évaluer les performances d'un outil d'évaluation, établis et définis

en 1974 par l'American Psychological Association, l'American Educational Research Association, et le National Council on Measurement in Education, et les a définis et adaptés à la validation d'un outil de simulation (3). Dans une récente revue de la littérature de 2016, Barsom et al. s'est intéressé aux outils de simulation en réalité virtuelle utilisés pour la formation médicale. Il a considéré que le processus de validation d'un tel outil de formation comprend plusieurs étapes interdépendantes, qui portent toutes sur sa capacité à améliorer ou à mesurer le concept pédagogique qu'il est censé améliorer ou mesurer. Il a défini cinq étapes de validation : la validité de surface, la validité de contenu, la validité de construction, la validité convergente, et la validité de transfert (Tableau 1) (4).

La validité de surface (face validity) :

Il s'agit du degré de ressemblance que le simulateur offre par rapport à la réalité. La validité de surface peut être évaluée à l'aide d'un questionnaire remis aux participants après l'utilisation du simulateur. La plupart des questionnaires utilisés dans les études de validation sont des échelles de jugement de type Likert (Likert scale) : le participant doit exprimer son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation en donnant une note chiffrée (exemple : 1 pas du tout d'accord ; 2 pas d'accord ; 3 neutre ; 4 d'accord ; 5 tout à fait d'accord) (5). Cependant, la force et la pertinence scientifiques de la validité de surface sont controversées, et elle a été jugée insuffisante à la validation d'un simulateur (6). Il s'agit d'un type de validation très subjectif qui n'est généralement utilisé que pendant les phases initiales du développement de l'outil de simulation (3).

La validité de contenu (content validity) :

Elle correspond au niveau d'adéquation entre l'objectif d'enseignement et celui offert par le simulateur. Elle est évaluée grâce à des questionnaires utilisant également des échelles de Likert et soumis à des experts (5). La validité de contenu est aussi très subjective car elle repose souvent sur l'avis d'experts qui jugent de la pertinence et de l'adéquation du simulateur par rapport à l'objectif d'enseignement (3).

La validité de construction (construct validity) :

Elle correspond à la capacité du simulateur à discriminer les différents niveaux d'expérience. La meilleure méthode pour la caractériser est de soumettre le dispositif à l'évaluation par un grand nombre de chirurgiens avec des niveaux variés d'entraînement et d'expérience, et de mettre en évidence une différence de résultats en rapport avec les différences de niveau présumées (3,5,7). La validité de construction est un élément de validation d'un simulateur indispensable et de grande valeur.

La validité convergente (concurrent validity) :

Elle représente la performance du simulateur par rapport à la méthode d'enseignement de référence utilisée appelée « gold standard ». Cela implique la comparaison des résultats obtenus grâce au simulateur par rapport à la méthode de référence à l'aide d'une évaluation objective. Les OSATS (Objective Structured Assessment of Technical Skills), ou méthode d'évaluation structurée et objective des compétences techniques en français, ont été décrit par Martin et al. en 1997 (8). Reznick et al. a montré la validité de construction de cette méthode pour évaluer les performances des chirurgiens (9). Elle est reconnue et de plus en plus utilisée comme moyen d'évaluation objectif dans des études de validation d'outils de simulation en chirurgie (10,11). La méthode d'enseignement de référence pour la mastoïdectomie est la dissection de rocher sur cadavre (12,13). Dans une étude de validation de la dissection de rocher sur cadavre, les auteurs utilisent notamment les OSATS qui sont une association de la Global Rating Scale (échelle de notation globale) et de la Task-Based Checklist (liste de tâches à accomplir) (14). Pour évaluer la validité convergente d'un outil d'enseignement de mastoïdectomie alternatif à la dissection de rocher sur cadavre, il faut donc comparer les résultats obtenus grâce aux OSATS sur le support alternatif par rapport aux résultats sur rocher cadavérique.

La validité de transfert (predictive validity) :

Elle correspond à la capacité d'un simulateur à améliorer les performances en pratique réelle et non pas seulement sur le simulateur. Il s'agit d'une étape fondamentale dans la validation d'un simulateur, et la plus pertinente cliniquement. L'enseignement par la simulation doit montrer une amélioration des performances au bloc opératoire. L'évaluation de la validité de transfert se fait grâce à des études contrôlées et randomisées, comparant les performances au bloc opératoire de chirurgiens ayant suivi un enseignement par un simulateur aux performances de chirurgiens n'ayant pas suivi cet enseignement. Les performances évaluées peuvent être la performance globale, le temps pour réaliser une procédure, l'habilité à terminer une intervention, la nécessité de prise de contrôle par l'encadrant, la mesure des erreurs, la fluidité de l'intervention et ses différentes étapes, l'efficacité opératoire, la productivité d'une équipe, les résultats cliniques auprès des patients (15). Toutes ces stratégies de validation ont leur importance, cependant la validité de transfert est celle qui est la plus susceptible de fournir une évaluation cliniquement significative, les autres validités portant sur l'évaluation de la formation ou du simulateur plutôt que sur les résultats cliniques (3).

Au total, la validité d'un simulateur est une notion complexe, composée de plusieurs types de validités. Les plus pertinentes scientifiquement sont celles qui sont objectives, comme la validité de transfert, la validité convergente, mais également la validité de construction. Ce sont aussi les plus contraignantes à mettre en évidence par le type d'étude à mettre en place. La validation d'un simulateur ne repose pas sur des critères précis et définis permettant de conclure à sa validité, elle nécessite plusieurs études. Le type de validité mis en évidence, la méthodologie employée dans les études et le nombre d'études de validation sont des arguments de validité d'un simulateur (3,4).

Critère de validation	Description	Critère de succès	Type d'étude adaptée
Validité de surface	Le degré de ressemblance entre la RV et l'objectif d'enseignement	Évaluation homogène et positive de la ressemblance entre la RV et l'objectif d'enseignement par des experts et des novices	Questionnaire après utilisation de la RV
Validité de contenu	Le degré d'adéquation entre le contenu de la RV et l'objectif d'enseignement	Évaluation homogène et positive du contenu de la RV par des experts	Questionnaire après utilisation de la RV
Validité de construction	La différence entre les résultats obtenus par des experts et par des novices en RV concernant l'objectif d'enseignement	Différences des résultats obtenus entre des utilisateurs de niveaux différents considérées comme statistiquement significatives	Étude comparative évaluant les résultats obtenus en RV par des utilisateurs de niveaux différents
Validité convergente	Le degré de concordance entre les résultats obtenus en RV par un utilisateur et ses résultats obtenus avec la méthode de formation de référence (« gold standard ») pour le même objectif d'enseignement	Résultats obtenus significativement concordants entre la RV et le « gold standard »	Étude comparative évaluant les résultats obtenus avec les deux méthodes de formation chez les mêmes utilisateurs
Validité de transfert	Le degré de concordance entre les résultats obtenus en RV par un utilisateur et ses performances dans la réalité pour le même objectif d'enseignement	Résultats obtenus significativement concordants entre la RV et la réalité	Essai contrôlé randomisé comparant les performances dans la réalité entre un groupe d'intérêt se formant en RV et un groupe témoin se formant avec une autre méthode

Tableau 1 : Les cinq critères de validation d'un outil de simulation en réalité virtuelle utilisé pour la formation médicale (d'après Barsom 2016).

1.4 Différents types de simulation en santé

Le domaine de la simulation en médecine est très vaste. Il existe différents types de simulation, qui peuvent être classés selon plusieurs points de vue. Chiniara et al. propose deux classifications : l'une en fonction des modalités de simulation (Tableau 2), et l'autre en fonction du simulateur utilisé (Tableau 3) (16).

Modalité de simulation	Description
Simulation sur ordinateur	L'utilisateur interagit avec la simulation à travers une interface de type écran
Simulation hybride	Le principe est de combiner au moins deux modalités de simulation
Simulation procédurale	Un simulateur permet l'entraînement à des compétences psychomotrices spécifiques et à leurs procédures associées
Immersion clinique simulée	L'environnement, réel ou simulé, joue un rôle important car il reproduit l'environnement professionnel : l'expérience peut impliquer des acteurs, des patients, ou des simulateurs de patient.
Patient simulé	Un acteur, un patient, ou un simulateur de patient joue le rôle d'un patient réel

Tableau 2 : Classification des différents types de simulation en santé en fonction des modalités de simulation (d'après Chiniara 2013).

Simulateur utilisé	Description
Acteur	Un acteur joue le rôle d'un patient au cours d'une séance de simulation (par exemple pour le travail de la relation médecin-patient)
Logiciel informatique	Un programme informatique reproduit en totalité ou en partie des équipements réels (par exemple pour l'anesthésie)
Simulateur organique	Les simulateurs organiques sont par exemple les cadavres ou les modèles animaux
Simulateur synthétique	Un simulateur synthétique reproduit une partie spécifique d'un patient (par exemple le rocher synthétique)
Patient réel	Un patient réel joue son propre rôle au cours d'une séance de simulation
Mannequin	Un mannequin à taille réelle reproduit des comportements et caractéristiques d'un patient (par exemple pour la réanimation cardio-respiratoire)
Patient virtuel	Un programme informatique permet d'interagir avec un patient virtuel pré-programmé à travers une interface de type écran
Réalité virtuelle	Un simulateur produit par le biais d'un ordinateur une interface réaliste et délivre des résultats (par exemple le rocher sur simulateur en réalité virtuelle)
Univers virtuel	Un programme informatique permet une immersion dans la reconstitution numérique d'un environnement à travers une interface de type écran, l'utilisateur interagit souvent avec la simulation par le biais d'un personnage numérique ou « avatar »

Tableau 3 : Classification des différents types de simulation en santé en fonction du simulateur utilisé (d'après Chiniara 2013).

2. Histoire de la simulation

2.1 Les secteurs pionniers en simulation

La simulation est un moyen d'apprentissage utilisé depuis de nombreuses années dans d'autres domaines « à risque » que celui de la santé : l'aéronautique, la marine marchande, et l'industrie nucléaire. Les modalités de simulation sont très différentes, mais elles ont permis de répondre à un double objectif : d'une part l'amélioration de la sécurité dans ces secteurs dits « à risque », et d'autre part la réduction des coûts de formation dans ces domaines (1).

La simulation en aéronautique :

L'aéronautique est considérée comme le berceau de la simulation professionnelle à grande échelle. Les premiers simulateurs de vol sont apparus au début du XXème siècle, quasi en même temps que les avions eux-mêmes. En 1929, Edwin Link inventa la « blue box », le premier simulateur de vol. La répétition des accidents mortels lors de l'entraînement initial sur des machines inconnues a motivé l'intérêt de l'armée américaine avec l'achat de 6 « Link trainers » en 1934, puis de 10.000 exemplaires en 1938. D'abord limitée techniquement à l'environnement de base du cockpit et à l'apprentissage des procédures, la simulation a été de plus en plus précise et réaliste, restituant le vol et le mouvement. Ces outils de simulation qui ont été initialement développés dans le domaine militaire, ont diffusé dans l'aviation civile après la seconde guerre mondiale. Les règlements internationaux de l'aviation civile imposent aujourd'hui la simulation comme outil de formation continue et d'entraînement obligatoire aux procédures et pannes. Les pilotes sont évalués et qualifiés sur cet outil. En plus des pilotes professionnels, la formation initiale et continue sur simulateur s'est imposée dans les années 1980 aux personnels de cabine pour les exercices d'évacuation ainsi qu'aux contrôleurs aériens. Les résultats de l'utilisation de la simulation comme outil de formation en aéronautique sont probants : les économies en prix sont importantes (un vol à vide coûte 50.000 € à 100.000 € selon la machine), et la formation de grande qualité puisque la simulation permet d'entraîner les personnels à ce qu'ils voient tous les jours et à ce qu'ils n'observeront jamais (1,17).

La simulation dans la marine marchande :

La simulation est aussi utilisée dans la marine marchande pour la formation des étudiants et des navigants confirmés. Introduite dès le début des années 1980 pour l'entraînement au travail sur radar, la simulation a depuis étendu son champ d'activité à tous les domaines du navire et augmenté sa fidélité jusqu'au niveau « full mission », niveau permettant par le réalisme des situations de travailler au-delà des tâches techniques sur les comportements en conduite du navire (1).

La simulation dans l'industrie nucléaire :

Dans ce domaine, des simulateurs « pleine échelle » reproduisent les salles de commande, ce qui permet de créer des situations les plus proches de la réalité d'exploitation pour entraîner une équipe à piloter un système technique complexe en collectif (1).

2.2 La naissance de la simulation en santé

La simulation dans le domaine médical a commencé il y a des siècles dans ses formes primitives.

Au XVIIIème siècle, une sage-femme, Madame Du Coudray (18), décide d'enseigner « l'art des accouchements » sur des mannequins (Figure 1A) permettant de récréer des manœuvres obstétricales et forme ainsi durant 25 ans à travers la France 5.000 femmes grâce à la simulation. Cette campagne aurait été suivie d'une nette diminution de la mortalité infantile (1).

A partir de 1910, un mannequin en bois surnommé Madame Chases (Figure 1B), du nom de sa conceptrice fabricante de jouets, sera utilisé par les élèves infirmières du Hartford Hospital Training School of Nurses pour la pratique des soins de nursing. Ce modèle va être perfectionné et sera toujours utilisé par l'armée américaine durant la seconde guerre mondiale (1).

Durant les années 1950, le Professeur Peter Safar du Baltimore City Hospital tente de perfectionner les manœuvres de réanimation cardio-respiratoire. Il met à contribution les membres de son équipe, les volontaires sont alors endormis et intubés. Dans le but de développer un modèle adapté à la réanimation cardio-respiratoire, il va s'associer au médecin Bjorn Lind, et au fabricant de jouet Asmund Laerdal qui fabrique déjà des patients factices pour l'armée. Ils développent ensemble un mannequin connu sous le nom de Resusci-Anne (Figure 1C) au début des années 1960 (1,17,19).

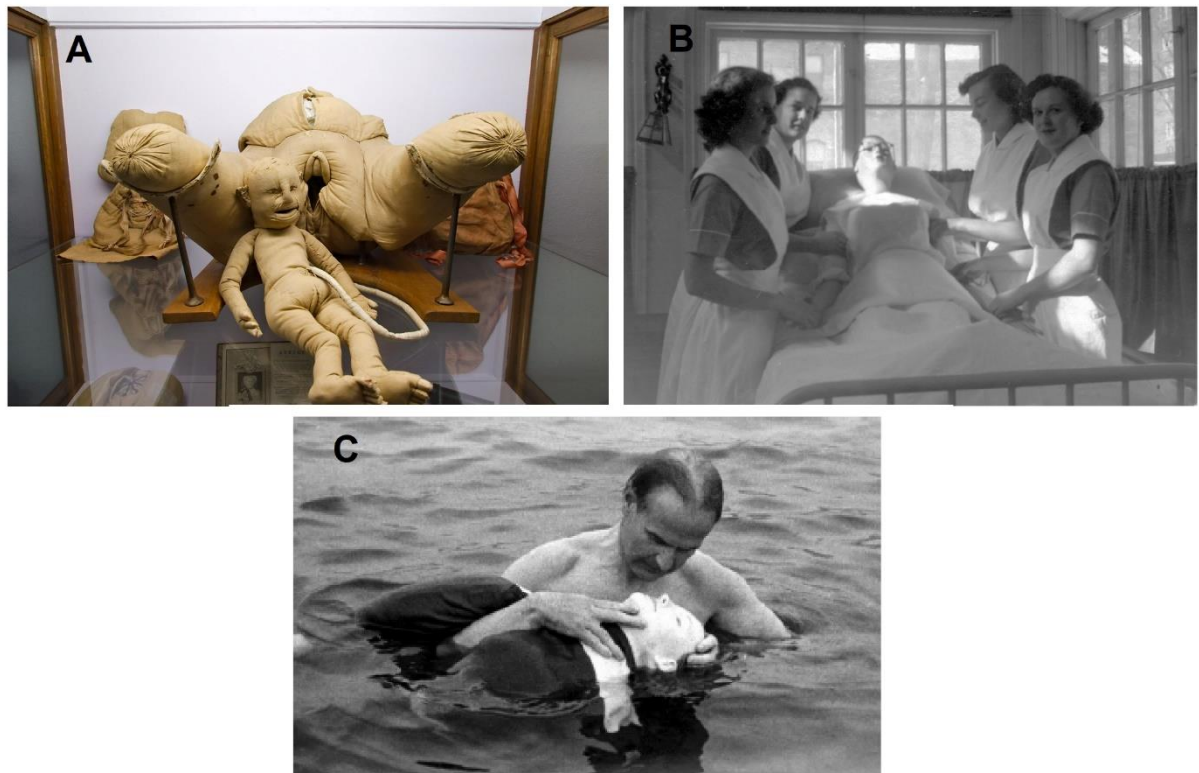


Figure 1 : Les premiers mannequins de l'histoire.

A. Mannequin de Madame Du Coudray exposé au musée Flaubert et d'histoire de la médecine à Rouen.

B. Madame Chases entourée de ses infirmières (d'après le site du musée virtuel du Canada).

C. Resusci-Anne dans les bras d'Asmund Laerdal (d'après Cooper 2008).

À la même époque, les médecins Stephen Abrahamson et Judson Denson mettent au point le premier mannequin contrôlé par ordinateur, le Sim One (Figure 2A). Il sera le modèle qui inspirera, par ses capacités et son réalisme, les mannequins haute-fidélité actuels (1,17,19).

Toujours dans les années 1960, un autre mannequin de simulation, Harvey (Figure 2B), est mis au point par le Docteur Michael Gordon. Il est entièrement dédié à la cardiologie et peut mimer plus de trente pathologies cardiaques (1,17,19).

Parmi les différentes spécialités médicales, c'est en anesthésie-réanimation que les avancées seront les plus importantes. Par exemple, en 1984, le Docteur Philip développe le logiciel GasMan (20) qui simule les échanges pharmacologiques de différents produits en anesthésie. En 1986, le Docteur Gaba met au point le Comprehensive Anesthesia Simulation Environment (Figure 2C) (21) dans le cadre de ses recherches sur les facteurs humains et la gestion des crises en anesthésie. Ce simulateur était composé d'un simulateur de monitoring, d'une tête d'intubation modifiée et d'un bras de perfusion (1,17,19).

L'amélioration des mannequins a permis de mettre au point des modèles physiologiques de plus en plus développés. L'apparition de la technologie « sans fil » a conduit à la confection de mannequins mobiles pouvant être déplacés, des urgences au bloc opératoire et en réanimation, permettant de créer de vrais scénarios de prise en charge médico-chirurgicale en équipe. En 2007, le premier mannequin haute-fidélité iStan (Figure 2D) bénéficie de ces avancées. La reproduction de la peau est très proche de la réalité, et il comporte quelques modules d'urgences chirurgicales : plaies, traumatologie ostéoarticulaire et trachéotomie (22).

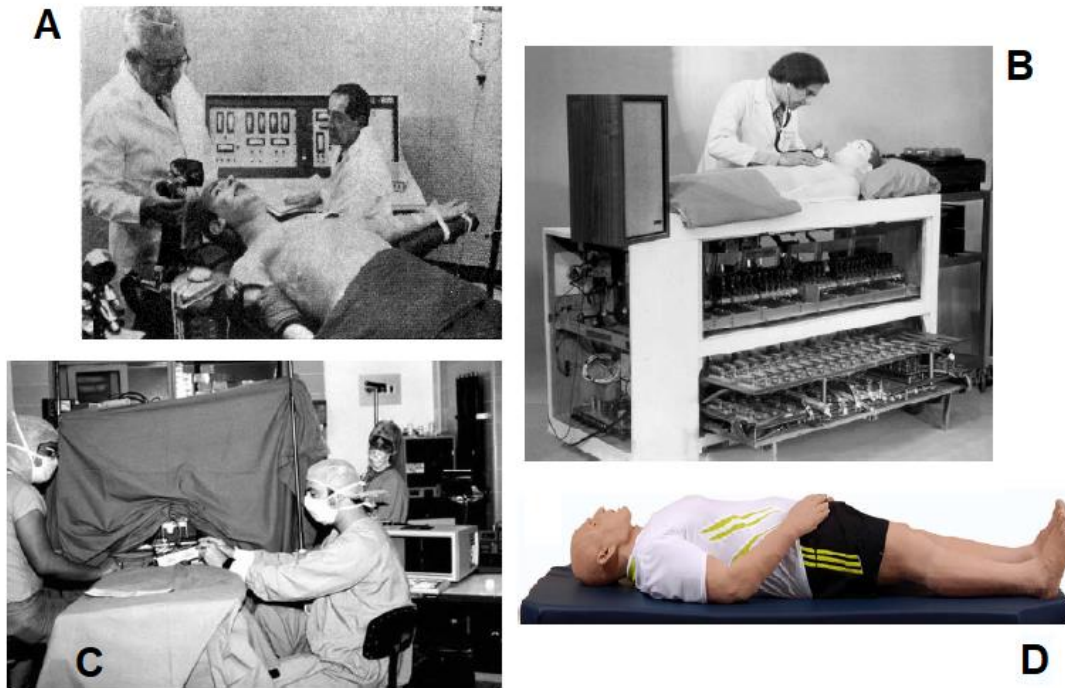


Figure 2 : L'évolution vers des mannequins haute-fidélité.

A. Sim One (d'après Cooper 2008).

B. Harvey en cardiologie (d'après Cooper 2008).

C. Comprehensive Anesthesia Simulation Environment en anesthésie (d'après Cooper 2008).

D. iStan (d'après Satava 2008).

Spécifiquement en chirurgie, la simulation doit permettre l'apprentissage, l'entraînement et la répétition de gestes. Elle existe depuis des siècles avec la pratique de la simulation sur des cadavres ou des modèles animaux. Différentes phases dans l'accès aux sujets anatomiques se sont succédées. Au XIX^{ème} siècle, l'approche systématique de l'anatomie a été adoptée. Mais la forte demande de dissection cadavérique a conduit à commettre des actes meurtriers. En 1832, l'Anatomy Act a donc légitimé et régulé la pratique de dissection sur cadavre. Historiquement, les autorités religieuses limitaient la fourniture de cadavres pour la dissection. C'est dans ce contexte qu'a été rédigé le Human Tissue Act en 1961 au Royaume-Uni, autorisant l'utilisation de tissus humains dans un cadre légal à des fins d'enseignement et de recherche. Par la suite, d'autres lois (Anatomy Act en 1984, Anatomy Regulations en 1988, Human Tissues Act en 2004) ont limité l'utilisation des tissus humains à des fins d'enseignement uniquement pour les sujets ayant donné leur consentement (12). La limitation de l'accès aux dissections sur cadavre a conduit au développement d'alternatives pour l'apprentissage par la simulation.

La simulation en chirurgie a alors bénéficié de l'apparition des nouvelles technologies et des progrès industriels, permettant l'élaboration de mannequins et de modèles synthétiques de plus en plus perfectionnés, et le développement de la simulation en réalité virtuelle grâce aux progrès en informatique et au numérique. C'est en 1987 qu'a commencé l'utilisation de la réalité virtuelle en simulation chirurgicale grâce à Jaron Lanier. L'un des premiers simulateurs en réalité virtuelle était un simulateur de jambe, le limb simulator (Figure 3A), servant à réaliser des réparations du tendon d'Achille dont le résultat était analysable par la « marche » de la jambe réparée. Le premier simulateur commercialisé en 1983 était le Minimally Invasive Surgery Trainer-VR (Figure 3B), qui combinait un outil d'entraînement avec une image graphique virtuelle, permettant l'entraînement à la chirurgie coelioscopique. Concernant l'Oto-Rhino-Laryngologie (ORL), un outil de simulation sophistiqué dédié à la chirurgie endonasale a été développé en 1994 : l'ENT Sinus Surgery Simulator (Figure 3C) (22).

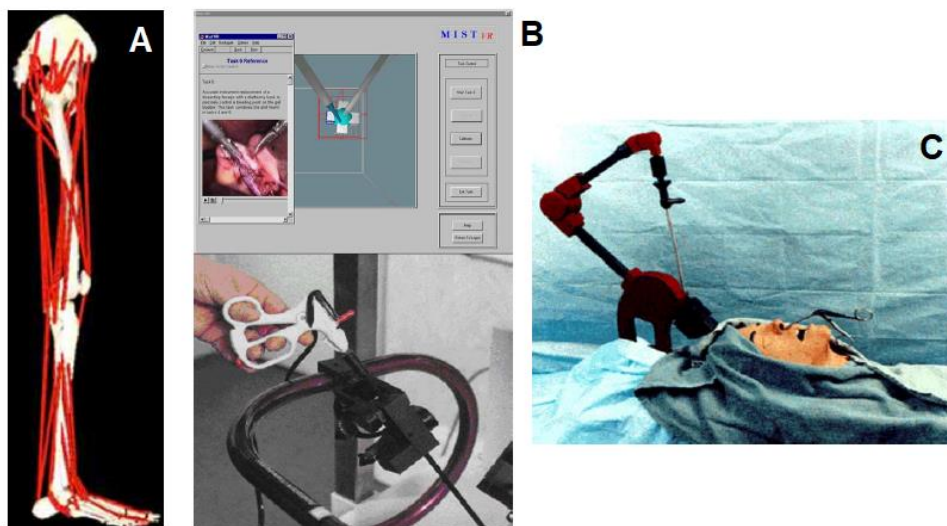


Figure 3 : Les premiers simulateurs en réalité virtuelle.

A. Limb simulator pour l'orthopédie (d'après Satava 2008).

B. Minimally Invasive Surgery Trainer-VR pour la chirurgie coelioscopique (d'après Satava 2008).

C. ENT Sinus Surgery Simulator pour l'ORL (d'après Satava 2008).

En 2001, aux États-Unis, la publication du rapport « To Err is Human » (23) accélère le développement de la simulation en santé, par la prise de conscience qu'il suscite de l'importance du facteur humain dans les erreurs médicales et propose la simulation médicale comme l'un des moyens d'en réduire la fréquence (1).

3. La simulation pour l'apprentissage de la chirurgie

3.1 Place de la simulation pour l'enseignement en chirurgie

L'acquisition des compétences chirurgicales se fait classiquement au bloc opératoire selon un modèle de compagnonnage : le chirurgien expérimenté va montrer et expliquer l'intervention dans un premier temps, puis laisser faire à son interne les différents temps opératoires avec une augmentation progressive de la difficulté des gestes à réaliser, jusqu'à la réalisation par l'interne toujours supervisé par le chirurgien expérimenté de tous les temps opératoires de l'intervention (24). La formation des chirurgiens est enracinée dans cette méthode d'apprentissage avec des niveaux croissants de responsabilité, développée il y a plus d'un siècle, et considérée jusqu'à récemment comme le standard de l'enseignement chirurgical.

Cette méthode d'apprentissage est souvent complétée par d'autres moyens : cours et conférences, vidéos de démonstration chirurgicale, entraînements pratiques par la dissection sur cadavres ou sur modèles animaux. Plus récemment, l'apparition de la simulation pour l'enseignement en santé est venue compléter la formation des internes en chirurgie, permettant la réalisation d'entraînements pratiques sur des supports non organiques : supports synthétiques et électroniques comme la réalité virtuelle. Plusieurs facteurs expliquent le développement et l'intérêt récent pour la simulation en chirurgie :

- Les contraintes législatives limitant la pratique de la dissection (12).
- Les progrès technologiques : informatiques pour la réalité virtuelle, et industriels pour les simulateurs synthétiques.
- L'apparition et le développement de nouvelles approches et technologies chirurgicales, en particulier la laparoscopie et la chirurgie endoscopique.
- La sécurité du patient mise au premier plan : « Primum non nocere ». En 2016, une étude américaine a considéré les erreurs médicales comme la troisième cause de décès des patients (25). La simulation peut être utilisée comme méthode de détection et de prévention de l'erreur (26).

- L'intérêt croissant pour la pédagogie. Associé à l'évaluation de l'efficacité des méthodes d'enseignement, cela a conduit à une remise en cause des méthodes d'enseignement traditionnelles.

- La nécessité de réduction des coûts. La volonté d'améliorer le rapport coût-efficacité concerne tous les domaines de la société, et a aussi gagné le domaine de l'enseignement en santé. En 1999, une étude américaine a évalué le coût de la formation des chirurgiens au bloc opératoire à 53 millions de dollars annuel (27).

- La réduction du temps d'apprentissage au bloc opératoire des chirurgiens en formation. Ce temps d'apprentissage est aujourd'hui réduit par rapport à leur prédécesseur pour deux raisons : les chirurgiens enseignants ont de plus en plus une contrainte de temps opératoire à respecter, et les internes ont bénéficié d'une limitation récente de leur temps de travail diminuant donc le temps clinique et l'apprentissage au bloc opératoire (28). Aux Etats-Unis, l'Accreditation Council for Graduate Medical Education a adopté en 2003 la semaine de 80 heures de travail pour les internes (29). En Europe également, l'European Working Time Directive a réduit en 2009 le temps de travail des internes à une moyenne de 48 heures par semaine (30).

- La judiciarisation de la médecine et de la chirurgie, avec un recours de plus en plus fréquent à la justice de la part des patients.

3.2 Validation et intégration de la simulation pour l'enseignement en chirurgie

Beaucoup d'études ont été menées sur l'apport et l'efficacité des supports d'enseignement par simulation dans la formation des chirurgiens. Elles s'accordent pour affirmer qu'ils offrent un complément efficace. Par l'entraînement dans un laboratoire de simulation, un chirurgien peut acquérir des compétences cognitives, techniques et non techniques pour réduire le temps d'apprentissage en salle opératoire et améliorer ses performances. Plusieurs revues de la littérature ont confirmé que l'enseignement par la simulation permettait notamment une amélioration objective des performances des chirurgiens au bloc opératoire, une diminution du temps opératoire, une capacité améliorée à terminer l'intervention, et un taux inférieur d'erreurs per-opératoires (15,31–33).

L'intégration de modules de simulation dans la formation des chirurgiens a été croissante récemment (4,34). Cependant, les pratiques et recommandations concernant la simulation dans les programmes d'enseignement diffèrent selon les pays.

Les Etats-Unis sont un pays précurseur dans le domaine de la simulation. En chirurgie générale, la Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons a lancé en 2004 le programme Fundamentals of Laparoscopic Surgery. Il s'agissait de la première initiative nationale majeure en simulation chirurgicale. Le programme comprenait des modules théoriques et pratiques. La validation de ce programme a ensuite été rendue obligatoire en 2008 par l'American Board of Surgery pour l'obtention du certificat initial (35–37). En 2007, l'American College of Surgeons et l'Association of Program Directors in Surgery se sont associés pour lancer un « National Skills Curriculum », visant à standardiser le cursus de formation des internes en chirurgie en intégrant notamment des modules de simulation (38). Plus spécifiquement en ORL, l'American Academy of Otolaryngology a créé en 2011 l'Otolaryngology Surgical Simulation Task Force. Il s'agissait d'un groupe de travail chargé de faire un état des lieux sur l'intégration de la simulation dans les programmes de formation proposés aux internes en ORL au sein des différentes universités aux Etats-Unis. La majorité des établissements (80 %) ont rapporté avoir incorporé une activité de simulation dans leur programme, avec des moyens disponibles au sein de leur institution (39). Aux Etats-Unis, la simulation fait aujourd'hui partie intégrante de la formation médicale, et la qualité de la formation par simulation représente un argument d'attractivité des établissements de santé (1).

Au Royaume-Uni, la Joint Committee on Surgical Training Strategy 2013-2018 affirme que l'une des priorités actuelles est de maximiser l'utilisation des techniques de simulation dans la formation chirurgicale, considérant qu'il s'agit d'une étape essentielle pour améliorer la sécurité des patients (40). En Australie, le Strategic Plan 2014-2018 du Royal Australian College of Surgeons recommande de promouvoir l'utilisation de la simulation, de soutenir la formation novatrice, et d'établir des partenariats avec les chirurgiens afin d'augmenter la fréquence des séances de simulation (41).

La France semble avoir du retard dans ce domaine par rapport aux pays anglo-saxons. En France, la simulation est une activité émergente qui intéresse de plus en plus le monde de la santé (1). En 2019, la Haute Autorité de Santé recommande l'élaboration d'un programme de simulation en gestion des risques (26). En effet, la sécurité du patient est une préoccupation majeure, et la survenue d'erreurs médicales peut avoir des conséquences lourdes. La

simulation pourrait alors être utilisée comme méthode de détection et de prévention de ces erreurs. La Haute Autorité de Santé décrit trois types d'approches de l'utilisation de la simulation pour la gestion des risques. La première approche est la méthode de gestion des risques dite « a priori ». La simulation est utilisée de manière préventive, pour former les professionnels de santé et réduire leur risque d'erreurs potentielles. Il s'agit alors d'entraîner la capacité des équipes à faire face à des situations à haut risque d'erreur et de développer la synergie d'équipe, facteur majeur de la sécurité. La deuxième approche est basée sur l'utilisation du retour d'expérience, c'est la méthode de gestion des risques dite « a posteriori ». Elle consiste à partir d'erreurs médicales, et à reconstruire les situations en simulation afin d'identifier les dysfonctionnements. La troisième approche plus récente est ciblée sur la communication avec le patient, en particulier dans l'annonce de maladie grave, et dans les prises en charge critiques permettant d'atténuer à la fois la souffrance des patients et des professionnels. Ces recommandations de la Haute Autorité de Santé marquent une avancée dans l'intégration de la simulation dans le domaine de la santé en France.

3.3 Applications de la simulation pour l'enseignement en chirurgie ORL

Les simulateurs utilisés pour l'enseignement en ORL peuvent être regroupés en trois types: les simulateurs organiques (sur cadavre ou modèle animal), les simulateurs synthétiques, et les simulateurs en réalité virtuelle.

Une revue de la littérature de 2017 a étudié les différents types de simulateurs utilisés en ORL et chirurgie cervico-faciale (42). Les auteurs ont identifié 70 articles décrivant 64 simulateurs : 12 simulateurs pour la chirurgie endoscopique naso-sinusienne, 20 simulateurs pour la chirurgie pharyngo-laryngée, et l'otologie était la sur-spécialité la plus représentée avec 32 simulateurs. Concernant la chirurgie endoscopique naso-sinusienne, il s'agissait de simulateurs en RV, de modèles animaux type ovin, et de modèles synthétiques. Concernant la chirurgie pharyngo-laryngée, il s'agissait essentiellement de modèles synthétiques, suivi de modèles animaux, puis de simulation en RV et sur cadavre. La majorité des simulateurs étaient dédiés à la chirurgie laryngée, il existait également des simulateurs d'amygdalectomie et de thyroïdectomie. Concernant l'otologie, il existait des simulateurs de paracentèse avec pose d'aérateur trans-tympanique : majoritairement des modèles synthétiques, et quelques

simulateurs en RV (Western Myringotomy Simulator®). Il existait également des modèles synthétiques de stapédotomie. Les simulateurs pour la chirurgie du rocher étaient les plus représentés en ORL, et sont ceux qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études de validation, notamment pour la technique de la mastoïdectomie. Les simulateurs sur support synthétique étaient les plus nombreux, devant les simulateurs en RV (VOXEL-MAN TempoSurg®, Mediseus Surgical Drilling Simulator®, Visible Ear Simulator®, Ohio State University Simulator®, Stanford Surgical Simulator®), et en dernier la dissection sur cadavre.

Une autre revue de la littérature de 2014 s'est intéressée uniquement à la simulation en réalité virtuelle en ORL (43). Les auteurs ont identifié 21 études de validation : 6 validant des simulateurs en RV pour la chirurgie endoscopique naso-sinusienne (Endoscopic Sinus Simulator®, Dextroscope®), 3 validant des simulateurs en RV pour l'apprentissage de la paracentèse (Western Myringotomy Simulator®), et la chirurgie du rocher était la plus représentée avec 12 études de validation (VOXEL-MAN TempoSurg®, Mediseus Surgical Drilling Simulator®, Ohio State University Simulator®, Stanford Surgical Simulator®).

Dans ces deux revues de la littérature, le simulateur ayant fait l'objet du plus grand nombre d'études de validation en ORL était le VOXEL-MAN TempoSurg®.

4. Les supports de simulation pour la chirurgie otologique

En chirurgie otologique, la mastoïdectomie est un geste chirurgical à haut risque de complications par atteinte des structures nobles. Les lésions des éléments anatomiques de la région mastoïdienne peuvent avoir des conséquences lourdes pour les patients : paralysie faciale (lésion du nerf facial), surdité et vertiges (ouverture du labyrinthe), méningite (brèche de la dure-mère), hémorragie (lésion du sinus sigmoïde). Il est donc indispensable d'avoir une parfaite connaissance de l'anatomie de la mastoïde et une bonne maîtrise de la technique chirurgicale, afin d'anticiper la rencontre de ces structures nobles lors du fraisage et de prévenir les complications (Figure 4). La difficulté associée à la chirurgie otologique explique le développement de la simulation dans ce domaine. Les différents supports de simulation appliqués à la mastoïdectomie ont fait l'objet d'études de validation, et possèdent leurs avantages et inconvénients (13).

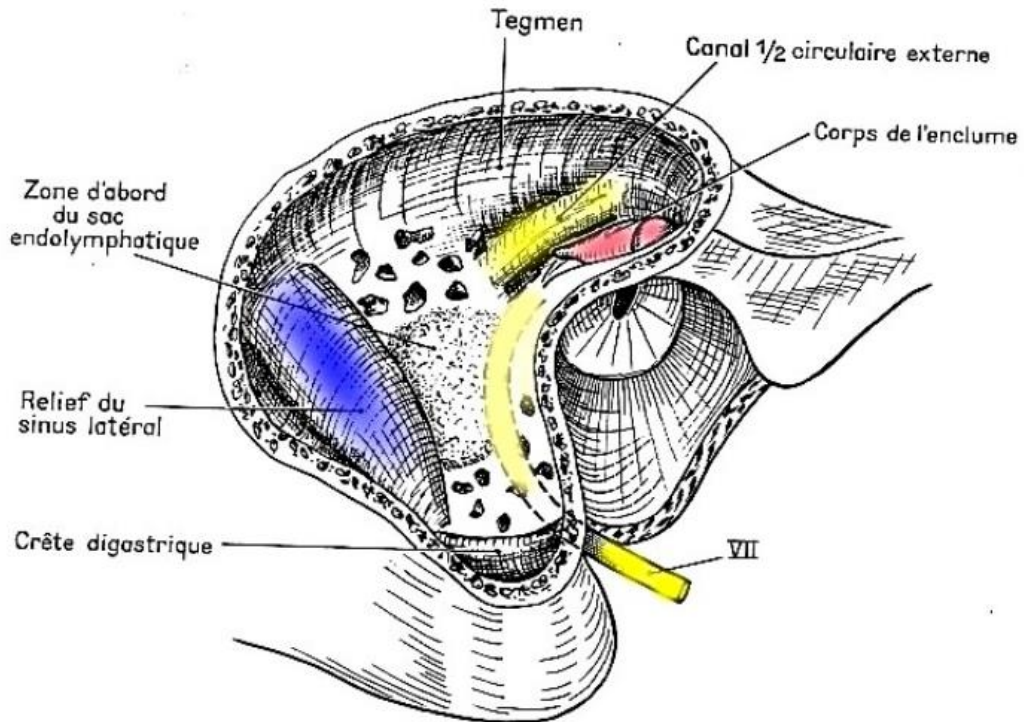


Figure 4 : Mastoïdectomie droite - repérage des structures à risque : nerf facial en jaune pâle, canal semi-circulaire latéral en jaune, enclume en rose, sinus sigmoïde en bleu, dure-mère.

4.1 Rocher de cadavre

Depuis l'antiquité, la découverte et l'apprentissage de l'anatomie se fait notamment grâce à la dissection sur cadavre. Le rocher de cadavre est le support de simulation considéré depuis de nombreuses années comme la référence ou « gold standard » pour l'apprentissage de la mastoïdectomie, initialement par tradition et plus récemment grâce à des études de validation établissant son efficacité (12,13).

Dans un article de 2014 étudiant les validités de surface et de contenu, Awad et al. a utilisé des échelles de jugement de type Likert auprès de chirurgiens expérimentés et en formation pour évaluer l'intérêt de la pratique de la dissection sur os temporal (OT) cadavérique pour l'apprentissage de la mastoïdectomie. Les résultats montrent un consensus

parmi les participants : il s'agit d'un modèle ressemblant à la réalité, utile pour l'enseignement, et qu'il faudrait intégrer dans le programme de formation (44). Dans une autre étude en 2007, Zirkle et al. s'est intéressé à la validité de construction : il a montré que les chirurgiens expérimentés étaient plus performants que les chirurgiens novices sur la réalisation d'une mastoïdectomie sur rocher de cadavre, en utilisant les OSATS comme méthode d'évaluation (14). Mowry et al. a prouvé la validité de transfert de la dissection sur OT cadavérique dans une étude publiée en 2014 : il a montré que les performances des chirurgiens novices lors d'une mastoïdectomie en temps limité sont corrélées au nombre de dissections préalablement exécutées par les participants (45).

Le rocher cadavérique reste aujourd'hui le support de référence pour s'entraîner à la mastoïdectomie. Les conditions opératoires lors d'une dissection sur OT cadavérique sont très proches des conditions réelles de chirurgie sur le plan graphique, anatomique, de l'installation et du retour de force. La variabilité anatomique d'un patient à l'autre est également retrouvée lors de la dissection de rocher sur cadavre, permettant aux chirurgiens plus avancés d'apprendre à gérer cette part d'inconnue.

Mais le rocher cadavérique présente plusieurs inconvénients, qui ont conduit au développement de supports de simulation alternatifs. Pour commencer, il existe de nombreuses limites logistiques à la dissection sur cadavre : son accès et sa disponibilité sont de plus en plus limités, et son coût est élevé à cause des moyens matériels et humains qu'il nécessite. Pour des raisons d'hygiène, de matériel, et de réglementation, la dissection sur cadavre ne peut se faire que dans un laboratoire d'anatomie. Le coût de l'aménagement d'un laboratoire d'anatomie peut aller jusqu'à 1 million de dollars (46), sans compter le prix de l'entretien des équipements. Concernant le coût d'une dissection sur rocher cadavérique dans un laboratoire d'anatomie, il est estimé entre 100 à 550 dollars (47). Il ne s'agit pas tant du coût d'un rocher de sujet anatomique, mais aussi et surtout des frais engendrés par la logistique de la simulation sur rocher cadavérique : le conditionnement du sujet, la conservation, l'entretien, les locaux avec des normes spécifiques, le personnel, le matériel de dissection (microscope, moteur, fraises, irrigation, aspiration). Le risque infectieux et sanitaire est un autre inconvénient de la dissection sur cadavre. Lorsque le corps est conservé par congélation, ce qui offre une meilleure qualité de conservation des couleurs des tissus, il existe un risque de transmission d'agents infectieux en particulier du virus de l'hépatite B (48). Enfin, ce support a aussi des inconvénients comme outil pédagogique concernant

plusieurs points. Bien que le réalisme soit très satisfaisant, les couleurs peuvent être dénaturées lorsque le mode de conservation du cadavre repose sur l'alcool ou le formaldéhyde. La répétition des simulations est impossible sur le même sujet anatomique, un rocher cadavérique offre une seule possibilité d'entraînement. Le modèle de rocher présenté par le cadavre ne peut être choisi, et il n'est pas possible de lui faire simuler une pathologie. L'évaluation et l'aide lors de la dissection ne peut être faite que par un examinateur extérieur, ce qui rend difficile l'utilisation de ce support pour une formation autonome.

4.2 Modèles animaux

Autre support de simulation organique, les modèles animaux sont assez peu utilisés dans l'enseignement de la chirurgie du rocher.

Il présente cependant certains avantages. Les têtes des animaux domestiques de ferme sont obtenues facilement à des coûts peu élevés (13). Les contraintes législatives sont plus souples pour l'utilisation des animaux à des fins de recherche et d'enseignement que pour les cadavres humains. Le rocher animal offre des similarités en termes de couleurs, de matière et de sensation de fraisage. Les rochers des porcins (49,50) et ovins (50) ont fait l'objet d'étude de similarité avec l'homme.

Mais ce support de simulation a aussi des inconvénients majeurs. Par rapport au rocher humain, les rochers des porcins et ovins présentent des différences anatomiques importantes au niveau du conduit auditif externe, des osselets, et la pneumatisation de la mastoïde est quasi nulle. Les primates sont la seule espèce animale ayant une mastoïde bien pneumatisée (51). Pour les mêmes raisons sanitaires que les cadavres humains, la dissection chez les animaux doit se faire dans un laboratoire, avec la nécessité de personnel et de matériel à l'origine de coûts de fonctionnement élevés. De plus, il existe un risque de transmission d'agents infectieux, car certains pathogènes touchant les animaux sont transmissibles à l'homme. La pratique de dissection sur cadavres d'animaux nécessite donc des précautions d'hygiène particulières (48).

4.3 Rocher synthétique

Le premier modèle de rocher synthétique a été rapporté en 1998 par Begall et al. (52). Plusieurs modèles ont été créés depuis, le premier disponible commercialement était l'os temporal Pettigrew® (Figure 5) (13). Il est fabriqué dans une résine de synthèse à partir de la numérisation de scanner de rochers humains. Le rocher synthétique est placé dans une mousse de plâtre malléable, permettant de maintenir son positionnement. La membrane tympanique et la muqueuse tapissant les cellules mastoïdiennes sont représentées par un matériau élastique de couleur rose. La dure-mère est colorée en rose et le sinus sigmoïde en bleu pour permettre leur identification. Le nerf facial est représenté par un matériau type caoutchouc coloré en rose pâle. La cavité de l'oreille moyenne contient les osselets mais pas de ligaments. La cochlée et les canaux semi-circulaires ne sont pas représentés. L'os temporal Pettigrew® procure la même sensation de retour de force que le rocher de cadavre humain, mais son fraisage génère beaucoup de poussière nécessitant une bonne irrigation (44). Utilisé durant des années par les otologues, une étude de validation sur son apport pédagogique pour l'apprentissage de la mastoïdectomie n'a été faite qu'en 2014 par Awad et al. (44). Les auteurs rapportent des erreurs anatomiques du modèle concernant la position du nerf facial au niveau du coude, qui est un repère clé pour la chirurgie du rocher. La lésion du nerf facial est une des complications les plus redoutées en chirurgie otologique, une mauvaise compréhension de la position de ce nerf pour des chirurgiens en formation peut donc s'avérer dangereuse.

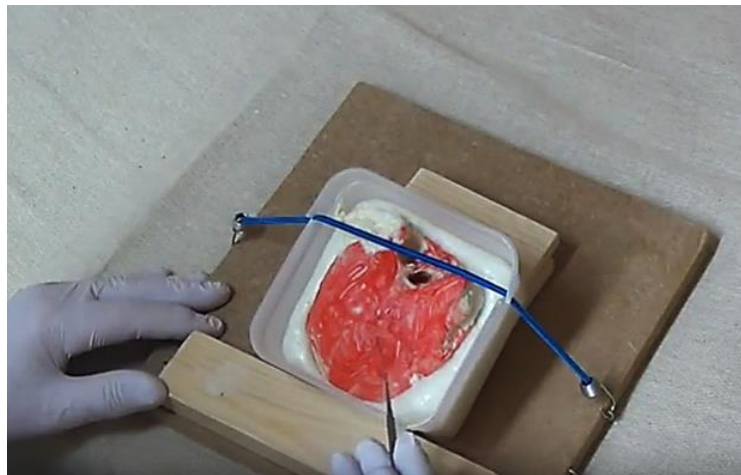
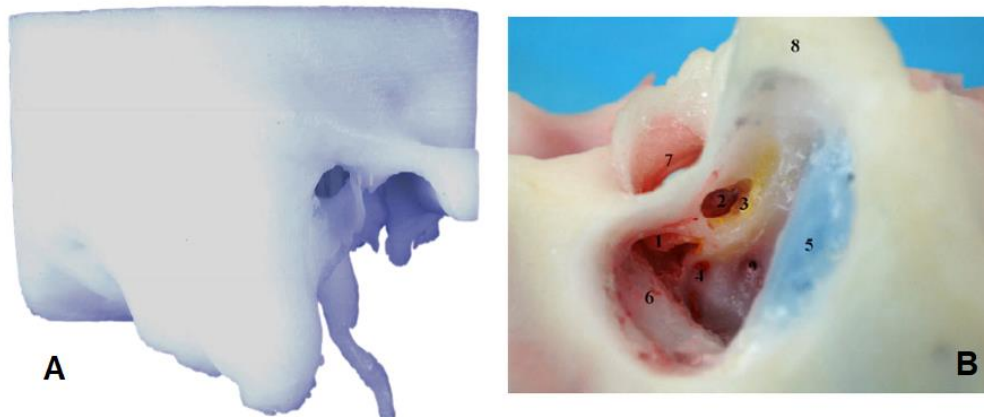


Figure 5 : Os temporal Pettigrew® (d'après le site Pettigrew Temporal Bones).

Un autre modèle de rocher synthétique a été développé en 2010 par Collin® en partenariat avec l'équipe d'ORL du Centre Hospitalo-Universitaire de Tours, leurs travaux ont abouti au Temp'Os® (Figure 6). Plusieurs études de validation de ce modèle ont été menées par l'équipe de Tours (47,53,54). Bakhos et al. a montré que le prototype était similaire anatomiquement à un os temporal cadavérique, et semblait donc être un bon modèle anatomique pour la formation chirurgicale (53). Chenebaux et al. a montré un taux de satisfaction de 92 % chez des otologistes expérimentés ayant pratiqué une mastoïdectomie sur ce prototype, laissant penser qu'il puisse apporter une solution attrayante à la pénurie d'os temporaux cadavériques (54). Enfin, Aussedat et al. a montré que l'entraînement sur ce rocher synthétique permettait une amélioration des performances de dissection sur rocher de cadavre chez de jeunes internes (47).

Dans son étude de 2017, Aussedat et al. cite d'autres modèles de rochers synthétiques : Phaçon®, Deismed®, ou encore Biomodex® (47).



*Figure 6 : Temp'Os® : rocher droit (d'après le site Collin Médical).
A. Avant fraisage.
B. Après mastoïdectomie.*

Le modèle de rocher synthétique publié par Hochman et al. (55) en 2014 a été généré par un nouvel algorithme appliqué aux données du scanner puis exporté vers une imprimante 3 dimensions (3D) (Figure 7). Selon les auteurs, ce processus pourrait être appliquées à partir de données provenant de n'importe quel scanner de rocher à haute résolution. D'autres auteurs

ont également décrit l'impression 3D d'os temporaux à partir de données scanographiques, en utilisant du plastique (56–58) ou du plâtre (59,60). Il est possible d'imaginer qu'à l'avenir les modèles de rocher synthétique soient réalisés facilement en impression 3D à partir de différents scanners de patients, permettant d'obtenir une gamme de variantes anatomiques de ces rochers synthétiques très intéressante pour l'apprentissage chirurgical. Il serait également possible de réaliser des modèles sur mesure générés à partir de scanner de patient en pré-opératoire, permettant de simuler l'intervention une ou plusieurs fois avant d'opérer le patient (61).

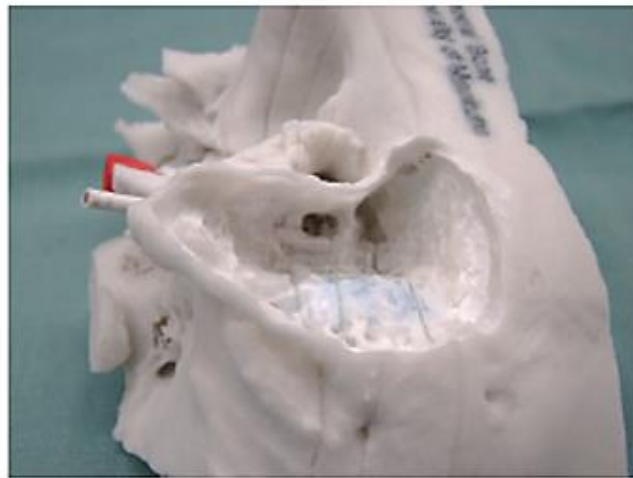


Figure 7 : Modèle de rocher synthétique gauche généré par une imprimante 3D (d'après Hochman).

Les avantages des modèles synthétiques sont nombreux. Tout d'abord, leur conception grâce à la numérisation de scanner de rochers assure normalement une bonne fiabilité anatomique. Ensuite, certains modèles offrent des modules permettant de simuler une pathologie de l'oreille moyenne. La simulation peut être faite en dehors d'un laboratoire d'anatomie. Les dépenses associées à ce type de simulation sont donc uniquement liées au rocher synthétique (par exemple le rocher Temp'Os® coûte 252 € d'après Collin®, le rocher Phacon® coûte 180 € d'après le site Phacon) et au matériel de dissection (microscope, moteur, fraises, irrigation, aspiration) qui peut être réutilisé à chaque simulation. Les modèles synthétiques sont facilement disponibles dans le commerce. Enfin, les dernières avancées permettent la production de modèles de rochers synthétiques sur mesure par l'utilisation d'imprimantes 3D via l'intégration de données de tomodensitométrie en haute résolution.

Mais les rochers synthétiques ont leurs limites communes à tous les modèles. La reproduction de la chaîne ossiculaire et de la pneumatisation de la mastoïde sont difficiles sur un modèle synthétique, ainsi que la reproduction tactile qui reste un peu différente de celle de l'os humain (13). Les couleurs données aux différents éléments anatomiques ne sont pas toujours proches de la réalité. Un autre inconvénient de ce support est qu'il ne permet qu'un seul fraisage par rocher. Enfin, l'évaluation et l'aide lors d'une séance de simulation sur rocher synthétique ne peut être faite que par un examinateur extérieur, ce qui rend ce support peu propice à une formation autonome.

4.4 Simulation en réalité virtuelle

Parmi les simulateurs en RV rapportés dans la littérature, les simulateurs dédiés à la chirurgie du rocher occupent la première place en ORL (43). Koppersmith et al. a été le premier à proposer en 1997 l'idée de la simulation virtuelle pour la chirurgie de l'os temporal (62). Les premiers simulateurs virtuels étaient peu ressemblants à la réalité. Les avancées technologiques et informatiques de ces dernières années ont permis une amélioration considérable, et ces premières versions ont été remplacées par des versions améliorées plus fidèles (13).

Trois plateformes de simulation en RV ont fait l'objet d'études de validation dans la littérature : le Mediseus Surgical Drilling Simulator®, le Visible Ear Simulator®, et le VOXEL-MAN Tempo® (13) que nous développons plus en détail par la suite.

Le Mediseus Surgical Drilling Simulator® (Figure 8) a été mis au point à l'Université de Melbourne. Une étude de Zhao et al. a montré que les chirurgiens expérimentés pratiquaient la dissection de rocher sur ce simulateur virtuel plus rapidement et avec moins d'erreurs que les chirurgiens novices, démontrant ainsi sa validité de construction (63). Il a également montré dans une autre étude que les résultats en dissection sur rocher de cadavre étaient améliorés chez des internes novices ayant bénéficié d'un entraînement sur ce simulateur virtuel par rapport à des internes novices n'ayant reçu qu'un enseignement traditionnel d'anatomie (64).



Figure 8 : Plateforme de simulation en réalité virtuelle Mediseus Surgical Drilling Simulator® (d'après Zhao).

Le Visible Ear Simulator® (Figure 9), développé au Danemark, a fait l'objet de plusieurs études de validation. Andersen et al. a montré que les scores de performance relevés chez des internes novices lors d'une dissection sur rocher de cadavre et lors d'une simulation sur cette plateforme semblaient être corrélés. Plus les internes complétaient d'étapes sur le simulateur, plus leurs scores de performance étaient élevés (65). Fang et al. a montré, grâce à des questionnaires d'évaluation soumis à des internes novices et à des chirurgiens expérimentés, l'utilité de ce simulateur pour apprendre l'anatomie du rocher et la technique chirurgicale, mais moins pour la capacité de transfert des compétences vers la chirurgie en conditions réelles. La simulation sur cadavre restait supérieure pour cet objectif (66). De même, Bennett et al. a constaté que le simulateur obtenait de bons scores pour l'apprentissage de l'anatomie, alors que son utilité pour l'apprentissage de la chirurgie était moins évidente (67). Andersen et al. a montré dans une autre étude que l'auto-formation sur le simulateur améliorait la performance des internes novices en dissection sur rocher cadavérique (68). Le vrai avantage de ce simulateur est son coût puisqu'il est en téléchargement libre, il fonctionne sur tout ordinateur équipé d'une carte graphique et rattaché à un dispositif de fraisage et de retour de force disponible dans le commerce (69). En revanche, il n'est équipé que d'un seul dispositif tactile, alors que les chirurgiens travaillent toujours avec les deux mains au bloc opératoire.

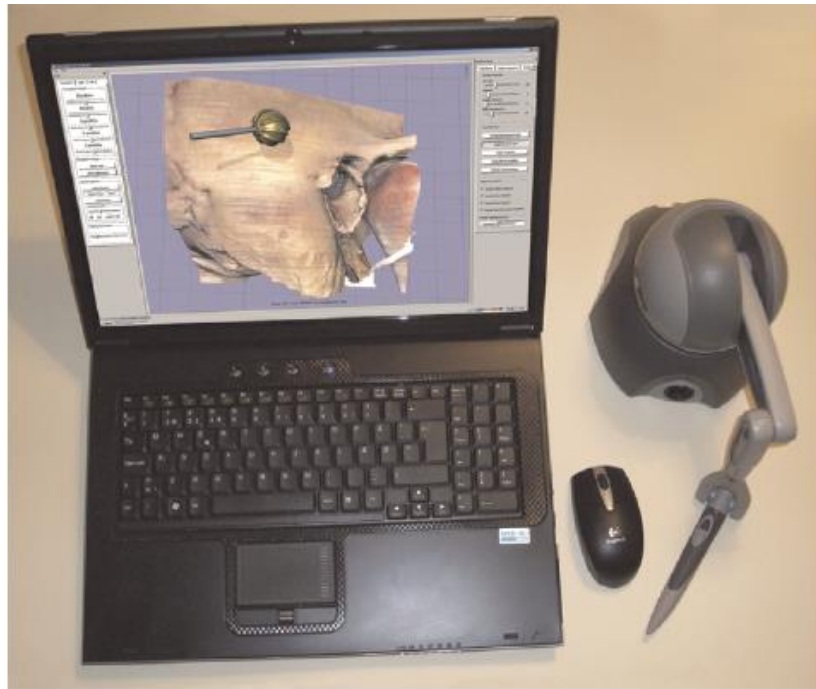


Figure 9 : Plateforme de simulation en réalité virtuelle Visible Ear Simulator® (d'après Sorensen 2009).

Les avantages de la simulation en RV sont nombreux. Les simulations peuvent être répétées autant de fois que le souhaite l'utilisateur. Selon la plateforme de simulation utilisée, le modèle de rocher peut être choisi : les participants ont le choix entre plusieurs possibilités d'anatomie de rocher plus ou moins difficile selon leurs niveaux, il existe également des modèles reproduisant des pathologies. L'évaluation du fraisage et l'aide peuvent provenir du simulateur, ce qui permet une formation autonome. La plateforme de simulation peut être installée dans n'importe quelle structure, et il n'y a pas de matériel consommable. Le seul achat à réaliser est celui de la plateforme de simulation : son coût est élevé à l'achat (par exemple la plateforme VOXEL-MAN Tempo® coûte 64.440 € d'après 3B Scientific®), mais le coût associé à la simulation est décroissant en fonction du nombre de simulations réalisées sur la plateforme.

Les défauts récurrents rapportés dans la littérature pour les simulateurs de rocher en RV sont une validité de surface insuffisante au niveau du graphisme, mais surtout au niveau du retour de force et des sensations tactiles de fraisage.

4.5 Comparaison des supports de simulation pour la chirurgie otologique

Le Tableau 4 résume les avantages et inconvénients des trois principaux supports de simulation dédiés à la chirurgie otologique.

Support de simulation	Avantages	Inconvénients
Rocher cadavérique	<ul style="list-style-type: none"> - Gold standard de la simulation en chirurgie otologique - Anatomie très proche de la réalité - Installation et sensation de retour de force très proches de la réalité - Variabilité anatomique 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible disponibilité et coût élevé - Contraintes logistiques liées au laboratoire d'anatomie - Risques sanitaires et infectieux - Couleurs altérées - Une seule dissection possible - Pas de possibilité de choisir un modèle anatomique en particulier ni de simuler une pathologie - Pas de possibilité d'auto-formation
Rocher synthétique	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne disponibilité et coût intéressant - Pas de contraintes logistiques liées au laboratoire d'anatomie - Pas de risques sanitaires ni infectieux - Anatomie proche de la réalité - Installation proche de la réalité - Possibilité de simuler une pathologie - Avenir : l'impression 3D 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensation de retour de force différente de la réalité - Couleurs différentes de la réalité - Une seule dissection possible - Pas de possibilité d'auto-formation
Rocher sur simulateur en réalité virtuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne disponibilité et coût rentabilisé - Pas de contraintes logistiques liées au laboratoire d'anatomie - Pas de risques sanitaires ni infectieux - Anatomie proche de la réalité - Plusieurs dissections possibles - Possibilité de choisir un modèle anatomique en particulier et de simuler une pathologie - Possibilité d'auto-formation 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût à l'achat très élevé - Installation et sensation de retour de force différentes de la réalité - Problème du graphisme

5. Le VOXEL-MAN Tempo®

5.1 Histoire

La plateforme VOXEL-MAN® a été développée à l'Université de Hambourg en 2005 pour l'enseignement de l'anatomie et de la chirurgie de la mastoïde. La première version intitulée « TempoSurg® » a eu des résultats de validité insuffisants en termes de ressemblance anatomique et du retour de force. La seconde version « Tempo® » a vu le jour en 2011, il s'agissait d'une version améliorée dans le but de corriger les défauts de la précédente (13).

5.2 Validation

Dans plusieurs revues de la littérature sur la simulation en ORL, le VOXEL-MAN TempoSurg® était le simulateur ayant fait l'objet du plus grand nombre d'études de validation concernant la chirurgie du rocher (42,43).

Validité de surface :

Dans une étude de 2012, Arora et al. a constaté que le simulateur obtenait de bons scores pour la représentation des structures anatomiques auprès de chirurgiens experts et novices, alors que la qualité du retour de force était moins évidente (70). Dans une récente étude de 2017 de Varoquier et al., l'équipe d'ORL du Centre Hospitalo-Universitaire de Nancy retrouve des résultats similaires auprès de chirurgiens experts (71).

Validité de contenu :

Dans la même étude d'Arora et al. de 2012, le simulateur a obtenu de très bons scores auprès de chirurgiens experts et novices concernant l'enseignement de l'anatomie, la formation à la technique chirurgicale, l'apprentissage de l'utilisation des instruments, l'entraînement à la coordination mains-yeux, et il a été évalué comme un bon outil de formation (70). Ces bons résultats sont confirmés par Arora et al. dans une autre étude de 2015 (72), et par Varoquier et al. (71). Reddy-Kolanu et al. a évalué l'avis de chirurgiens experts et novices sur l'intérêt de ce simulateur pour la formation : ils ont trouvé que les possibilités de répéter les simulations, de varier les modèles anatomiques et les pathologies étaient intéressantes pour l'apprentissage chirurgical (73).

Validité de construction :

Khemani et al. a montré la capacité du simulateur à discriminer les différents niveaux d'expérience des chirurgiens, notamment sur le temps de fraisage, le volume d'os fraisé, l'efficacité du fraisage, le temps passé durant lequel la fraise n'était pas correctement visualisée par l'opérateur, le nombre de lésions du sinus sigmoïde. Toutes ces données sont générées par le logiciel du simulateur (74). Varoquier et al., Arora et al. et Linke et al. ont également évalué la performance de chirurgiens expérimentés et novices sur le simulateur, et ont constaté que les chirurgiens expérimentés effectuaient la dissection plus rapidement et avec moins d'erreurs (71,72,75).

Nash et al. a mis en évidence une progression chez des chirurgiens novices effectuant des séances de dissection répétées sur le simulateur : le nombre de lésions et le temps de fraisage diminuaient significativement au fur et à mesure des simulations (76). Francis et al. a également montré que les compétences techniques pour la réalisation de tâches chirurgicales spécifiques étaient significativement améliorées grâce à la pratique répétée sur le simulateur (77). Les résultats de ces études laissent penser qu'une telle amélioration sur le simulateur pourrait aboutir à une amélioration en conditions réelles au bloc opératoire. D'autres études sont nécessaires pour élucider la preuve du transfert des compétences sur le simulateur à la salle d'opération et à des procédures plus complexes.

5.3 Coût

Le coût est celui de la plateforme de simulation. Celle-ci peut être installée dans n'importe quelle structure, et il n'y a pas de matériel consommable. Ainsi, une fois la plateforme de simulation achetée, le coût associé à la simulation est décroissant en fonction du nombre de simulations réalisées. Le prix d'achat de la plateforme de simulation VOXEL-MAN Tempo® est de 64.440 €. Donc si 10 simulations sont réalisées sur cette plateforme le prix d'une simulation est de 6.444 €, si 100 simulations sont effectuées le prix d'une simulation est alors de 644 €, et ainsi de suite. Plus le simulateur est utilisé, moins le coût associé à la simulation est cher.

5.4 Matériel

La plateforme de simulation VOXEL-MAN Tempo® est constituée des éléments suivants (Figure 10) (78) :

- Un ordinateur équipé d'une carte graphique.
- Une table à hauteur réglable électriquement, avec deux accoudoirs.
- Un dispositif de visualisation en 3D comprenant un écran de visualisation 3D et deux paires de lunettes de visualisation 3D.
- Deux dispositifs tactiles reproduisant la fraise virtuelle et l'aspiration virtuelle avec un retour de force. Ils permettent une vraie saisie en 3D avec retour de force en intégrant le sens du toucher. Ils peuvent mesurer précisément la position spatiale en 3D, ainsi que l'orientation du stylo tenu à la main. La sensation de retour de force est donnée grâce à des moteurs qui repoussent la main de l'utilisateur pour simuler le toucher et l'interaction avec des objets virtuels.
- Une pédale d'activation de la fraise virtuelle.

- Une souris d'orientation 3D permettant l'orientation et le zoom de la vue opératoire virtuelle grâce à 6 degrés d'orientation.



Figure 10 : Matériel de la plateforme de simulation en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo® (d'après le site Voxel-Man) : deux accoudoirs en orange, lunettes de visualisation 3D en bleu, deux dispositifs tactiles reproduisant la fraise et l'aspiration en jaune, pédale d'activation de la fraise virtuelle en rouge, souris d'orientation 3D en vert.

5.5 Logiciel

Le VOXEL-MAN Tempo® (78) dispose d'une interface graphique complète permettant une représentation graphique en 3D du patient lors de la simulation avec l'utilisation des lunettes de vision en 3D. La souris de navigation dans l'espace permet un positionnement libre du patient et un changement de zoom en temps réel. Le logiciel offre la possibilité d'avoir un système de navigation en temps réel, équivalent à une neuro-navigation. Il s'agit d'une navigation sur le scanner dans les trois plans de coupes selon la position de l'extrémité de la fraise virtuelle. Sur ces images de scanner, les tissus réséqués sont figurés en vert, la dure-mère est représentée par un liseré orange, et le sinus sigmoïde est coloré en bleu. Le mouvement des instruments est contrôlé grâce à deux dispositifs tactiles avec retour de force. L'un contrôle la fraise et l'autre l'aspiration. L'utilisateur doit choisir entre une fraise multipan et une fraise diamantée, il doit également choisir la forme et la taille de la fraise (Figure 11). L'activation de la rotation de la fraise se fait grâce à la pédale. L'aspiration est active en permanence et le calibre de l'aspiration est corrélé automatiquement à la taille de la fraise choisie.

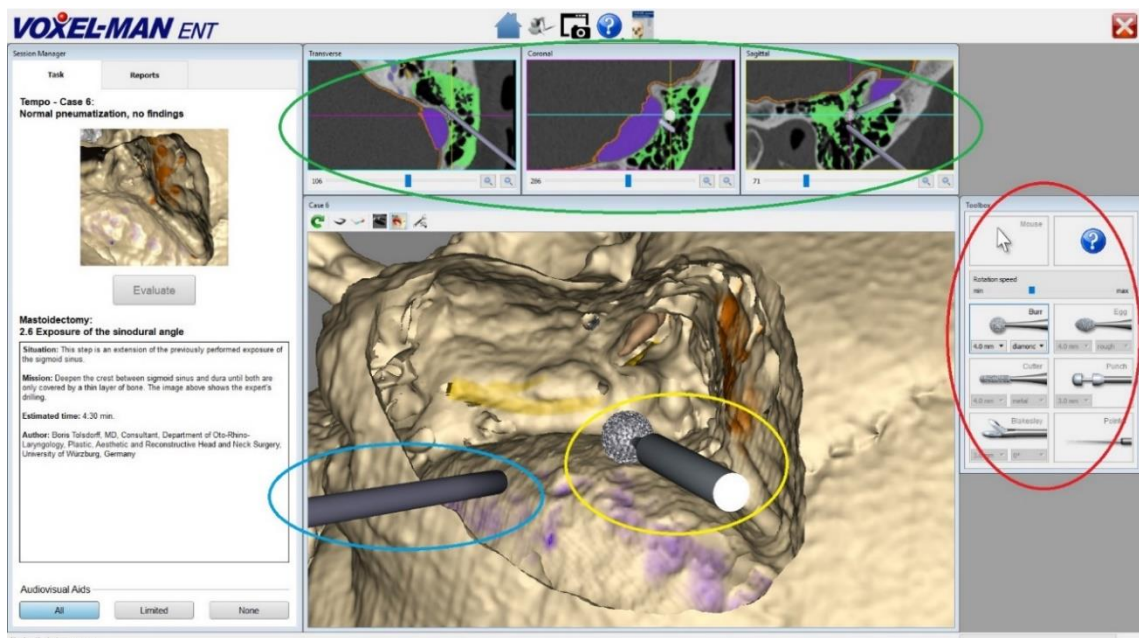


Figure 11 : Logiciel de la plateforme de simulation en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo® (d'après le site Voxel-Man) - représentation d'une mastoïdectomie gauche : aspiration virtuelle en bleu, fraise virtuelle en jaune, choix des fraises en rouge, neuro-navigation avec le scanner dans les trois plans de coupe en vert.

Le rocher est issu de données réelles de scanner de patient. Il existe sept rochers différents, plus ou moins pneumatisés, avec ou sans pathologie de l'oreille moyenne (cholestéatome), avec pour but la représentation de la variabilité naturelle qu'il existe entre les rochers humains. Les éléments anatomiques représentés sont l'os et les principales structures à risque. Les saignements sont représentés et adaptés à d'éventuelles blessures, comme par exemple une plaie du sinus sigmoïde. Le programme permet d'avoir des avertissements sonores et visuels lorsque la fraise est proche des structures à risque : dure-mère, sinus sigmoïde, labyrinthe postérieur, nerf facial, corde du tympan, osselets, mur postérieur du conduit auditif externe. Une alerte est également donnée lorsque ces structures sont blessées. Il est possible de désactiver ces avertissements. Le nerf facial est monitoré à l'aide d'un signal sonore.

Le logiciel permet la réalisation d'une simulation libre sans consignes ni objectifs, mais il offre également la possibilité de réaliser des exercices sous forme de tâches prédéfinies : antrotomie, mastoïdectomie ou technique ouverte. Une évaluation du travail réalisé est générée automatiquement à chaque fin d'exercice et repose sur la comparaison à des rochers fraisés au préalable par des experts. Les résultats générés en fin de fraisage par le simulateur sont : le temps de fraisage, le volume d'os fraisé par rapport à l'objectif, le temps en secondes durant lequel la fraise n'était pas visualisée par l'opérateur, le nombre de lésions des structures nobles, et le score lésionnel. Chaque session est enregistrée en intégralité et la vidéo peut être visualisée à distance. Les résultats analysés par le simulateur sont également enregistrés.

OBJECTIFS

L'**objectif principal** de notre étude prospective et comparative était d'évaluer l'intérêt de la simulation en réalité virtuelle pour l'apprentissage de la mastoïdectomie, en comparant les scores de performance et de technique obtenus lors de la réalisation d'une mastoïdectomie sur rocher cadavérique chez des internes d'ORL novices ayant bénéficié ou non d'un entraînement sur le simulateur en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo®.

Les **objectifs secondaires** étaient :

- Evaluer les connaissances et l'expérience des internes d'ORL novices concernant le domaine de la simulation en santé.
- Evaluer la progression des internes au cours de séances successives d'entraînement à la mastoïdectomie sur le simulateur en réalité virtuelle.
- Evaluer les défauts de performance et de technique des internes d'ORL novices lors d'une séance d'entraînement à la mastoïdectomie sur rocher cadavérique, pouvant être améliorés pour leur pratique future au bloc opératoire.
- Evaluer la satisfaction des internes après les séances d'entraînement à la mastoïdectomie sur simulateur virtuel et sur rocher cadavérique, et les aspects à améliorer de chaque support.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Population

L'étude était réalisée sur 20 internes d'ORL en troisième semestre, provenant de six villes d'internat différentes (Paris, Rouen, Caen, Amiens, Tours, Reims).

Concernant les critères d'inclusion, les participants devaient être internes en troisième semestre d'ORL au moment de l'étude, le but étant d'avoir un niveau homogène en chirurgie otologique entre les participants. Concernant les critères d'exclusion, les participants devaient être présents à toutes les séances de simulation virtuelle et/ou de dissection selon le groupe dans lequel ils étaient affiliés, et avoir rempli tous les questionnaires en fin d'étude.

La participation à cette étude était proposée à tous les internes en troisième semestre de ces six villes : Paris, Rouen, Caen, Amiens, Tours, Reims ; soit 27 internes au total. Elle se faisait alors sur la base du volontariat. Les participants étaient tous informés et consentants sur le fait d'être inclus dans le protocole d'une étude prospective et comparative.

Les 20 internes inclus étaient répartis entre deux groupes :

- Groupe « sans simulation » (n = 10) : réalisation d'une mastoïdectomie sur OT cadavérique ;
- Groupe « simulation » (n = 10) : séances d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle, puis réalisation d'une mastoïdectomie sur OT cadavérique.

Le groupe « sans simulation » servait de groupe contrôle, tandis que le groupe « simulation » représentait le groupe d'intérêt de cette étude. La répartition dans ces deux groupes était faite de façon à ce qu'il y ait autant d'internes provenant de chaque ville dans chacun des groupes, et le même ratio homme / femme, afin d'obtenir des groupes comparables.

2. Schéma de l'étude

2.1 Cours d'anatomie chirurgicale

Les participants recevaient en début d'étude un cours d'anatomie chirurgicale sous format vidéo. Ce cours portait sur l'anatomie de la région mastoïdienne et sur la technique chirurgicale pour la réalisation d'une mastoïdectomie. Cela permettait de remettre à niveau certains internes qui n'avaient pas encore eu l'occasion d'assister à une mastoïdectomie durant leurs stages, et ainsi d'homogénéiser le niveau entre les internes sur les connaissances anatomiques.

2.2 Simulation en réalité virtuelle

Les 10 internes inclus dans le groupe « simulation » bénéficiaient d'une séance d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle (Figure 12). Cette séance avait lieu 2 à 4 semaines avant la séance de dissection sur OT cadavérique. Elle se déroulait sur une journée à la Faculté de Médecine du Kremlin-Bicêtre (Université Paris Sud), où nous disposions de deux simulateurs VOXEL-MAN Tempo®. Les internes étaient donc au maximum deux à s'entraîner simultanément. Les participants s'entraînaient à la réalisation d'une mastoïdectomie sur trois modèles consécutifs : une mastoïde avec une anatomie standard côté gauche, puis une mastoïde avec une anatomie standard côté droit, et pour finir une mastoïde dense avec un anstre étroit représentant une anatomie plus difficile. S'il leur restait du temps à la fin de leur mastoïdectomie, ils pouvaient également s'entraîner à réaliser une tympanotomie postérieure.

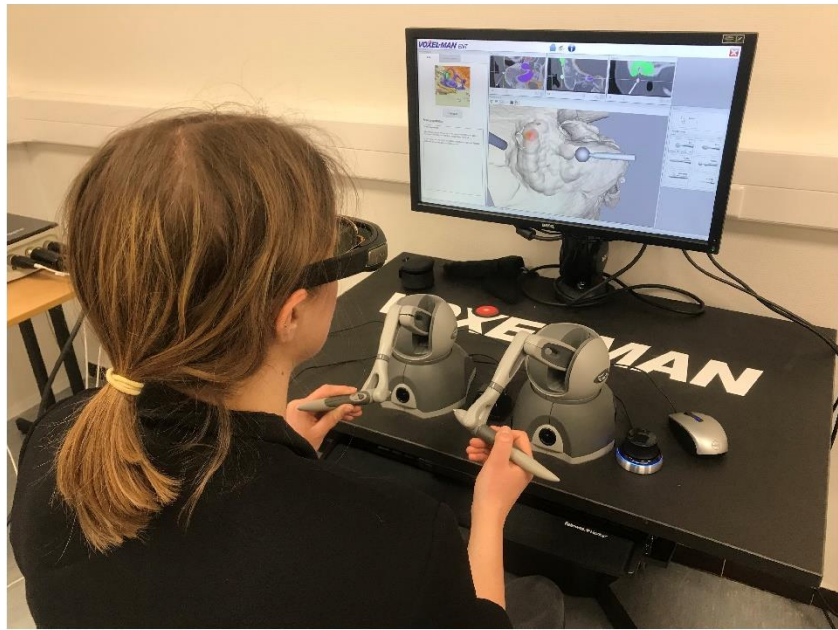


Figure 12 : Séance d'entraînement sur le simulateur en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo®.

2.3 Dissection sur os temporal cadavérique

Les 20 internes inclus dans l'étude participaient à une séance de dissection sur OT cadavérique (Figure 13). Cette séance de dissection se déroulait sur une demi-journée au laboratoire d'anatomie de l'Institut du Fer à Moulin à Paris, qui nous mettait à disposition les corps, les microscopes et les instruments chirurgicaux. Les moteurs, le système d'irrigation et les fraises étaient fournis par Medtronic®. Les internes étaient au maximum cinq à disséquer simultanément.

Les participants disposaient de 2h30 pour réaliser une mastoïdectomie, selon les temps chirurgicaux suivants :

- 1) Initiation du triangle de fraisage ;
- 2) Squelettisation de la dure-mère et du sinus sigmoïde ;
- 3) Amincissement de la paroi postérieure du conduit auditif externe ;
- 4) Repérage du canal semi-circulaire latéral ;
- 5) Repérage de la courte apophyse de l'enclume et de l'articulation incudo-malléaire ;
- 6) Repérage de la crête digastrique ;
- 7) Repérage de la troisième portion du nerf facial sur toute sa longueur.

Si les participants terminaient ces différents temps chirurgicaux avant la fin des 2h30 de dissection, ils pouvaient s'entraîner à réaliser une tympanotomie postérieure, mais ce geste ne rentrait pas dans les critères d'évaluation de l'étude.

Il faut noter que le côté opéré ainsi que l'anatomie de la mastoïde étaient variables d'un cadavre à l'autre.



Figure 13 : Séance de dissection sur os temporal cadavérique.

3. Critères d'évaluation

Les participants remplissaient au début de l'étude un **questionnaire pré-formation** (Annexe 1), portant sur l'expérience de l'interne en chirurgie otologique et sur ses connaissances en anatomie. Ce questionnaire pré-formation permettait de vérifier l'homogénéité de niveau théorique en otologie entre les deux groupes.

Lors des séances d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle, une évaluation du travail réalisé était générée automatiquement par le logiciel du simulateur en fin de fraisage. Les données suivantes étaient relevées pour les trois mastoïdectomies consécutives : le temps de fraisage, le nombre de lésions des structures nobles (nerf facial, corde du tympan, osselets, canal semi-circulaire latéral, sinus sigmoïde, conduit auditif externe, cerveau, dure-mère), le temps en secondes durant lequel la fraise n'était pas visualisée par l'opérateur, le score lésionnel (calculé par le simulateur en fin de fraisage en fonction du nombre de lésions des structures nobles et de la durée durant laquelle la fraise n'est pas visualisée, il peut aller de 0 à l'infini), et la réalisation ou non d'une tympanotomie postérieure. Ces données permettaient d'évaluer si les participants présentaient une amélioration au fur et à mesure de l'entraînement.

Les participants étaient évalués lors de la séance de dissection sur OT cadavérique. Leur performance et leur technique de dissection pour la réalisation d'une mastoïdectomie sur OT cadavérique étaient notées à l'aide d'échelles d'évaluation validées dans la littérature, respectivement **Welling Scale** (Annexe 2) (79–81) et **Task-Based Checklist** (Annexe 3) (14,81–83). La Welling Scale donnait un score de performance sur 20 points. Cette échelle d'évaluation consistait en l'analyse du produit final de dissection réalisée en fin de mastoïdectomie, évaluant l'interne sur sa performance de fraisage au niveau des différentes structures de la mastoïde : corticale, tegmen, sinus sigmoïde, anse sinodural, rainure du digastrique, conduit auditif externe, et nerf facial. La Task-Based Checklist donnait un score de technique sur 21 points. Cette échelle d'évaluation, utilisée dans les OSATS, portait sur l'analyse de la gestuelle et de la technique opératoire de l'intervenant pendant la réalisation de la mastoïdectomie, évaluant l'interne sur sa technique de fraisage des différentes structures : corticale, dure-mère, sinus sigmoïde, canal semi-circulaire latéral, et nerf facial. Le but était de comparer les scores obtenus entre les participants des deux groupes. Les échelles d'évaluation étaient remplies par deux évaluateurs confirmés en chirurgie otologique. Le score retenu pour chaque échelle d'évaluation était une moyenne réalisée entre les deux évaluateurs. De ce fait, les participants ne pouvaient pas demander aux évaluateurs de les orienter dans leur geste de mastoïdectomie, afin de ne pas biaiser les résultats.

Lors de la séance de dissection sur OT cadavérique, nous relevions également les variations anatomiques de la région mastoïdienne pouvant rendre la mastoïdectomie difficile, les lésions des structures nobles (lésions cérébro-méningées, vasculaires, nerveuses et labyrinthiques), la réalisation ou non de tous les temps chirurgicaux de la mastoïdectomie, et la réalisation ou non d'une tympanotomie postérieure.

Les participants remplissaient enfin un **questionnaire post-simulation virtuelle** (Annexe 4) et **post-dissection** (Annexe 5), correspondant à des échelles de jugement de type Likert, dans le but de recueillir leur avis sur ces deux différents supports de formation à la chirurgie otologique. Cela nous permettait de comparer l'opinion des internes sur la qualité de l'apprentissage de l'anatomie et de la technique chirurgicale entre la simulation virtuelle et la dissection sur OT cadavérique.

Les différentes étapes de l'étude sont résumées dans la Figure 14.

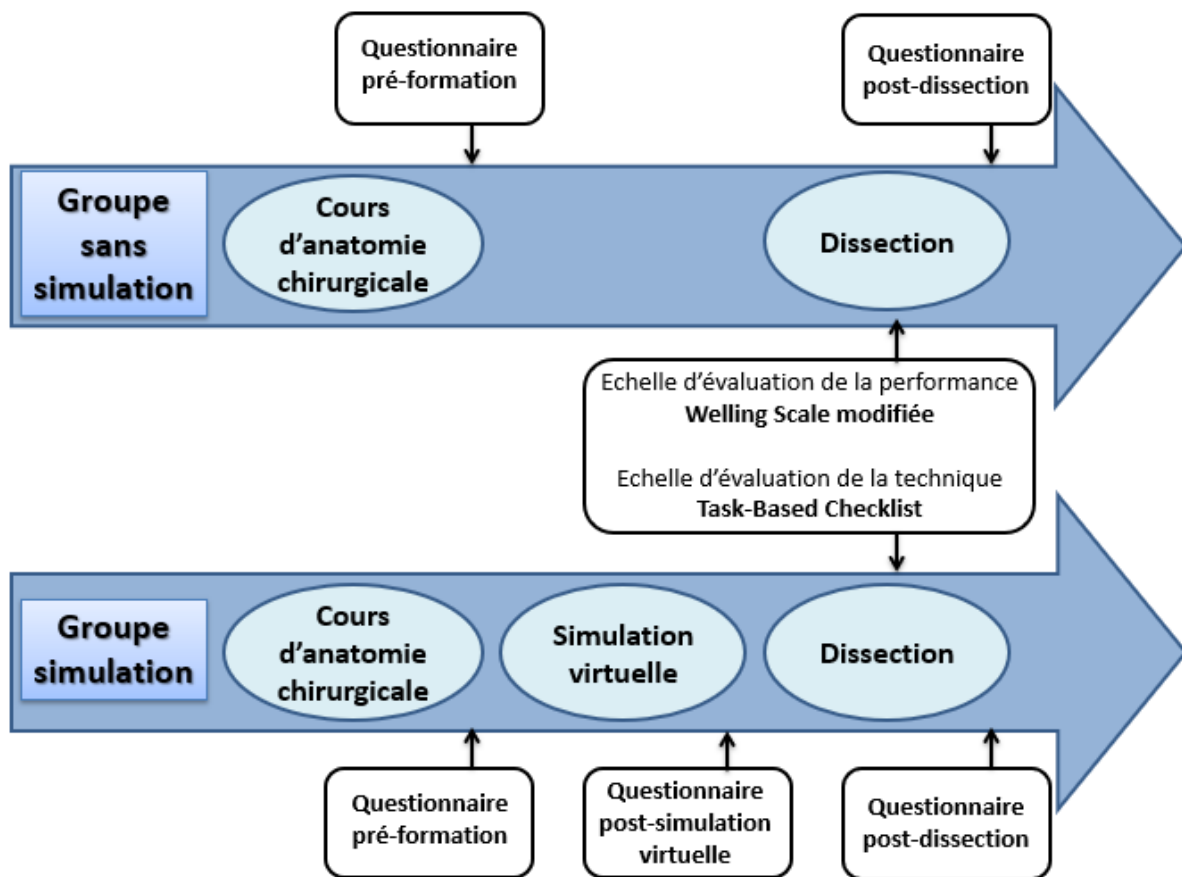


Figure 14 : Chronologie des différentes étapes de l'étude.

4. Statistiques

Les statistiques étaient réalisées à l'aide du logiciel GraphPad Prism.

Les groupes ne suivant pas une distribution normale, l'analyse comparative des deux groupes était réalisée grâce au test non paramétrique de Mann-Whitney.

Concernant le groupe « simulation », l'analyse comparative des scores obtenus au cours des séances successives de simulation virtuelle était réalisée grâce au test non paramétrique de Wilcoxon.

Les différences étaient considérées comme significatives si $p < 0,05$. Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes montrant les moyennes avec leur écart à la moyenne (SEM, *Standard Error of the Mean*).

RÉSULTATS

1. Population

1.1 Répartition finale de la population

Les 20 internes inclus étaient répartis entre les deux groupes :

- Groupe « sans simulation » (n = 10) : réalisation d'une mastoïdectomie sur OT cadavérique ;
- Groupe « simulation » (n = 10) : séances d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle, puis réalisation d'une mastoïdectomie sur OT cadavérique.

Concernant les 10 internes du groupe « sans simulation », aucun n'a été exclu. Concernant les 10 internes du groupe « simulation », 2 ont été exclus : l'un a participé à la séance d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle mais n'a pas pu participer à la séance de dissection, et l'autre n'a participé à aucune séance. Ainsi, nous avons pu évaluer pour cette étude 18 internes provenant de six villes : 9 de Paris, 2 de Rouen, 1 de Caen, 1 d'Amiens, 2 de Tours, 3 de Reims. Nous avons 10 internes dans le groupe « sans simulation » et 8 dans le groupe « simulation ». Lors des séances sur simulateur en réalité virtuelle, les données étaient recueillies sur les 9 internes ayant participé (Tableau 5).

Groupes	Nombre d'internes inclus	Nombre ayant participé à la simulation	Nombre ayant participé à la dissection
Groupe « sans simulation »	10	/	10
Groupe « simulation »	10	9	8
Les deux groupes	20	9	18

Tableau 5 : Répartition finale de la population de l'étude.

1.2 Caractéristiques de la population

Les deux groupes étaient comparables entre eux (Tableau 6).

Il n'y avait pas de différence significative entre le groupe « sans simulation » et le groupe « simulation » pour le ratio homme / femme (5:5 vs 3:5 ; $p = 0.64$) et l'âge des participants (25.7 [25-26] vs 26.1 [25-27] ; $p = 0.23$).

Concernant l'expérience des participants, aucune différence significative n'était mise en évidence entre les deux groupes pour le nombre de semestres effectués en ORL (1.9 [1-2] vs 2 [1-3] ; $p = 0.68$), le nombre de mastoïdectomies vues au bloc opératoire (10.3 [0-40] vs 9 [0-30] ; $p = 0.96$), le nombre de mastoïdes fraisées sur patient (1.9 [0-10] vs 2.4 [0-8] ; $p = 0.88$), sur cadavre (0.8 [0-4] vs 1 [0-3] ; $p = 0.40$), et sur simulateur virtuel (0.3 [0-2] vs 0.4 [0-1] ; $p = 0.57$). Concernant les connaissances anatomiques en chirurgie otologique, il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes pour le score obtenu au questionnaire d'anatomie (92.4 [87-98] vs 92.9 [90-97] ; $p = 0.89$) rempli en début d'étude par tous les participants et noté sur 100 points.

Caractéristiques	Groupe « sans simulation »	Groupe « simulation »	p
N	10	8	/
Ratio H : F	5 : 5	3 : 5	0.64
Age	25.7 [25-26]	26.1 [25-27]	0.23
Nombre de semestres effectués en ORL	1.9 [1-2]	2 [1-3]	0.68
Nombre de mastoïdectomies vues au bloc opératoire	10.3 [0-40]	9 [0-30]	0.96
Nombre de mastoïdes fraisées sur patient	1.9 [0-10]	2.4 [0-8]	0.88
Nombre de mastoïdes fraisées sur cadavre	0.8 [0-4]	1 [0-3]	0.40
Nombre de mastoïdes fraisées sur simulateur virtuel	0.3 [0-2]	0.4 [0-1]	0.57
Note au questionnaire d'anatomie /100	92.4 [87-98]	92.9 [90-97]	0.89

Tableau 6 : Caractéristiques de la population dans chaque groupe.

Les participants ont estimé être suffisamment préparés pour la réalisation de la mastoïdectomie sur OT cadavérique à 77.5 % dans le groupe « sans simulation », et à 84.4 % dans le groupe « simulation ».

Nous nous sommes intéressés aux méthodes utilisées pour la préparation d'une intervention chirurgicale par les internes, quel que soit leur groupe (Figure 15).

Les supports de travail les plus utilisés par les internes étaient les livres ou les articles de l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale à 77.8 %, et les vidéos de démonstration chirurgicale à 63 %. En revanche, la préparation d'une intervention par dissection sur cadavre n'était que de 18.5 %, et par simulation en réalité virtuelle de 5.6 %.

Parallèlement, les internes pouvaient avoir accès à un laboratoire d'anatomie dans toutes les villes de façon occasionnelle. Mais seuls les internes de Tours avaient accès à un simulateur virtuel (Visible Ear Simulator®).

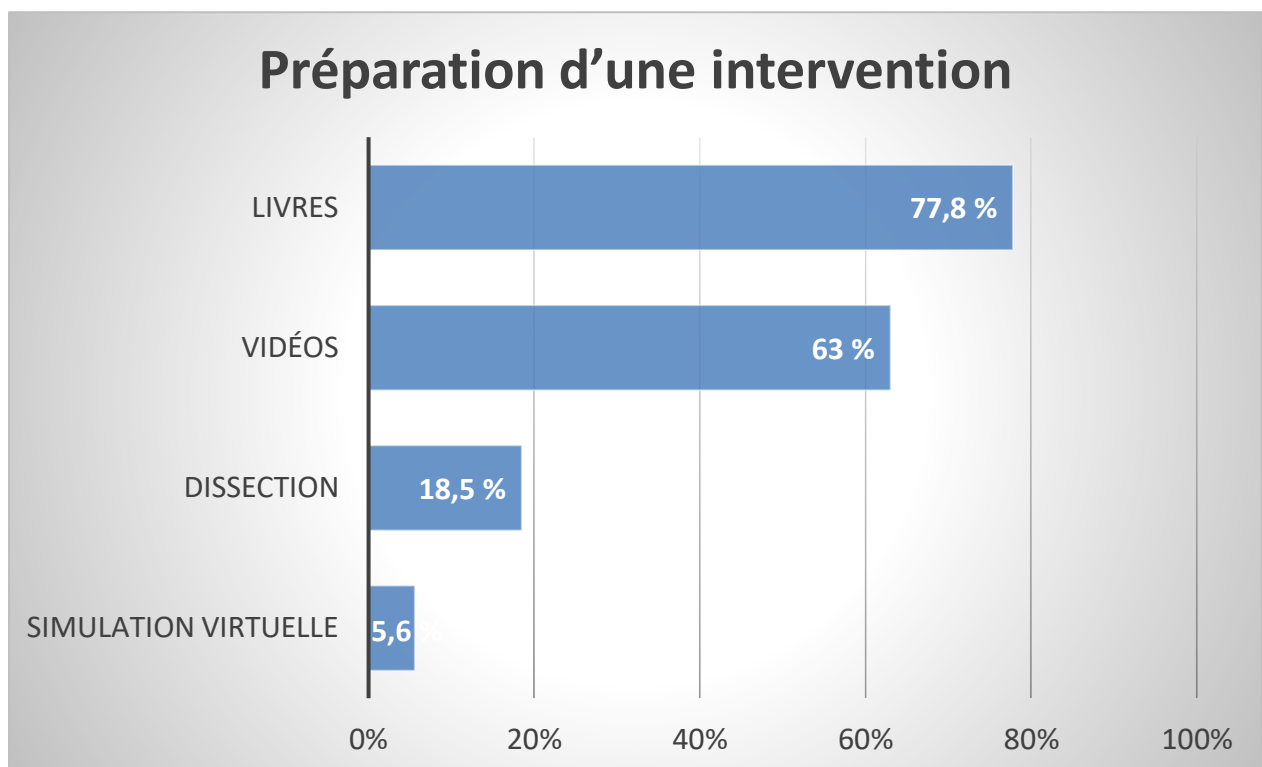


Figure 15 : Méthodes utilisées par les internes pour la préparation d'une intervention chirurgicale.

Nous nous sommes également intéressés à leur expérience concernant la simulation en santé (Figure 16).

83.3 % des participants connaissaient l'existence de la simulation dans le domaine de la santé. 100 % des participants pensaient que la simulation avait un vrai intérêt en médecine, que ce soit pour l'apprentissage de la chirurgie ou pour d'autres spécialités.

61.1 % avaient entendu parler de la simulation virtuelle pour le fraisage du rocher.

77.8 % des internes avaient déjà participé à une séance de simulation. 66.7 % avaient participé à des séances de simulation pour des spécialités non chirurgicales (urgences, réanimation, annonce diagnostique), 11.1 % à des séances de simulation dédiées à la chirurgie générale (coelioscopie), 38.9 % à des séances de simulation dédiées à l'ORL (fraisage de rocher, chirurgie endonasale, chirurgie au robot, trachéotomie, intubation au fibroscope, fibroscopie trachéo-bronchique pour extraction de corps étranger, otoscopie, audiométrie), et 27.8 % à une séance de fraisage de rocher (sur le VOXEL-MAN Tempo® à l'École de Chirurgie de Nancy-Lorraine ou sur le Visible Ear Simulator® à l'Université de Tours). Le taux de satisfaction concernant leur expérience de la simulation était de 97.4 %.

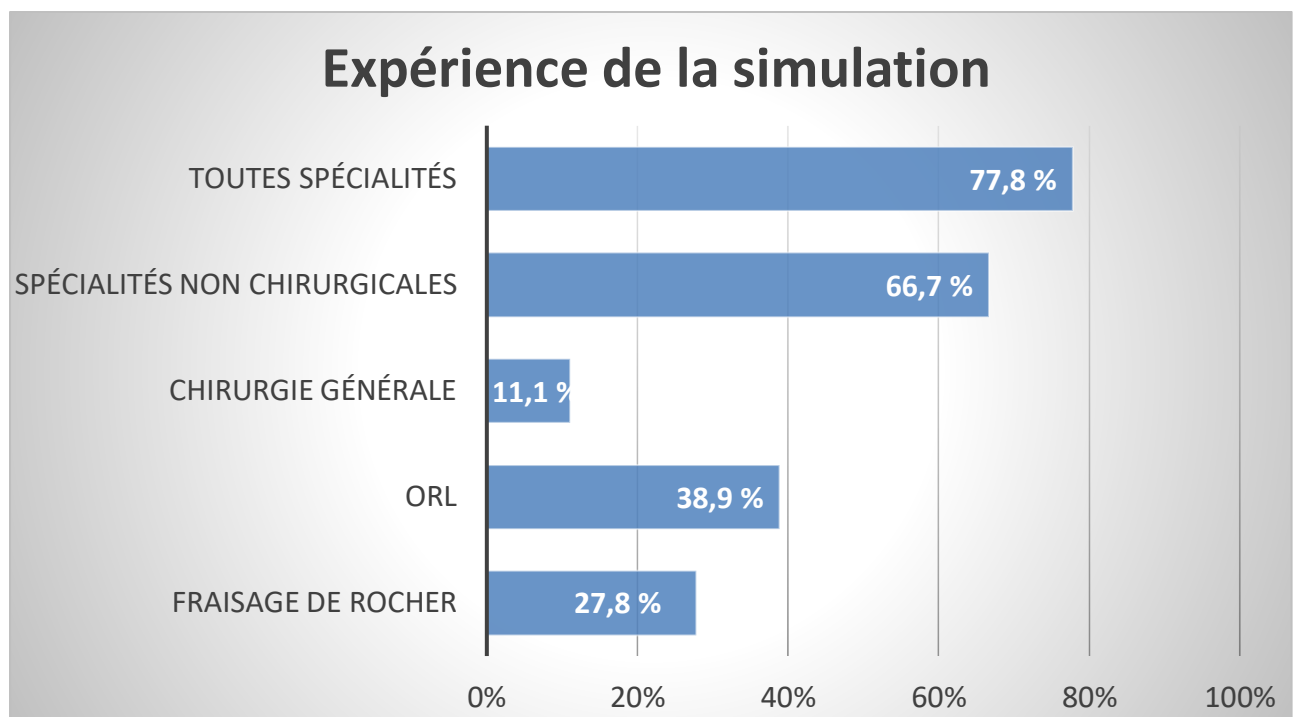


Figure 16 : Expérience des internes concernant la simulation en santé.

2. Evaluation lors de la dissection

Lors des séances de dissection sur OT cadavérique, les données étaient recueillies sur 18 internes : 10 dans le groupe « sans simulation » et 8 dans le groupe « simulation ».

2.1 Echelle d'évaluation de la performance Welling Scale

L'évaluation de la performance lors de la dissection sur OT cadavérique mettait en évidence une supériorité significative pour le groupe « simulation » ($p = 0.02$) avec un score moyen de performance de 14.3 [10-17] sur 20, comparativement à 11.4 [7-15] pour le groupe « sans simulation » (Figure 17).

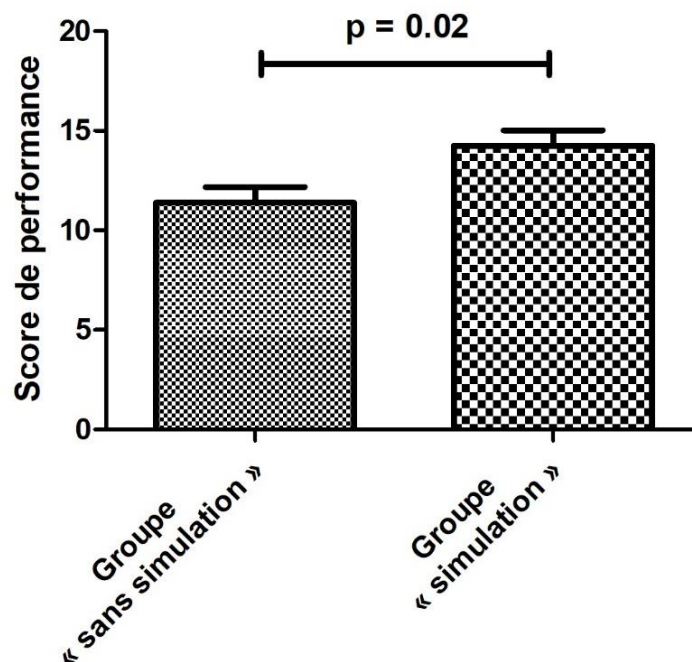


Figure 17 : Welling Scale : score de performance (sur 20 points).

En étudiant en détail le score moyen de performance obtenu pour chaque structure, il existe une supériorité significative du groupe « simulation » par rapport au groupe « sans simulation » pour le fraisage de la rainure du digastrique (1.13 [0-2] vs 0.4 [0-2] ; $p = 0.034$), du conduit auditif externe (2.38 [1-3] vs 1.5 [0-2] ; $p = 0.027$), et du nerf facial (1.51 [1-2] vs 0.7 [0-2] ; $p = 0.045$) (Figure 18).

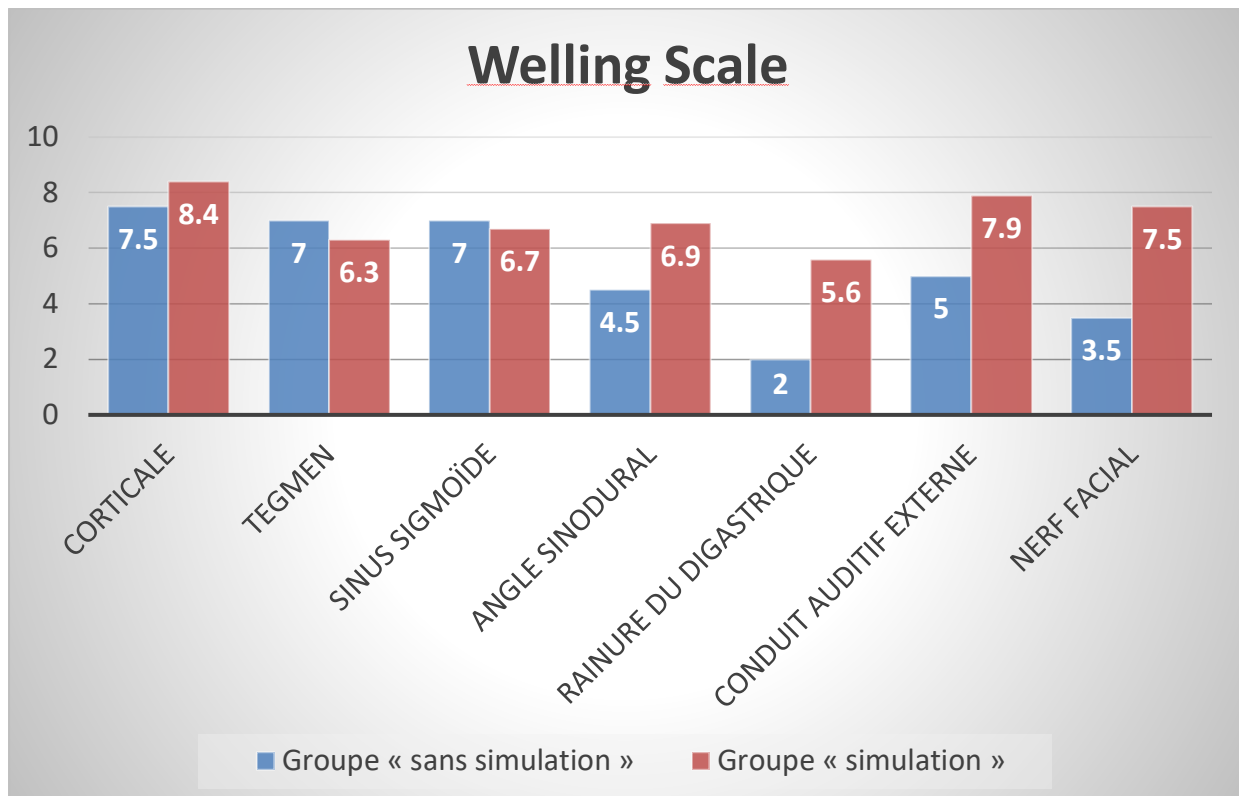


Figure 18 : Welling Scale : score de performance pour le fraisage des différentes structures (score rapporté sur 10 points).

Le Tableau 7 ci-après résume le score moyen sur 20 obtenu dans les deux groupes pour chaque item de l'échelle d'évaluation de la performance Welling Scale, et le p correspondant.

Welling Scale : Items		Groupe « sans simulation »	Groupe « simulation »	p
Corticale	Corticale arrondie à la linea temporalis	0.9	0.88	ns
	Corticale arrondie de la linea temporalis à la fosse cérébrale moyenne	0.9	0.88	ns
	Amincissement du mur postérieur	0.4	0.75	ns
	Saucérisation complète	0.8	0.88	ns
	Score corticale	3 [1-4]	3.39 [1-4]	ns
Tegmen	Dissection parallèle à la courbe durale	0.9	1	ns
	Exposition complète du tegmen	0.6	0.25	ns
	Pas de trou	0.8	1	ns
	Pas de cellule résiduelle	0.5	0.25	ns
	Score tegmen	2.8 [1-4]	2.5 [2-4]	ns
Sinus sigmoïde	Pas de trou	0.7	0.88	ns
	Pas de cellule résiduelle	0.6	0.25	ns
	Pas de surplomb	0.8	0.88	ns
	Score sinus sigmoïde	2.1 [1-3]	2.01 [1-3]	ns
Angle sinodural	Net et aigu	0.5	0.88	ns
	Pas de cellule résiduelle	0.4	0.5	ns
	Score angle sinodural	0.9 [0-2]	1.38 [0-2]	ns
Rainure du digastrique	Identification	0.3	0.88	0.02
	Tendon du digastrique suivi jusqu'au foramen stylomastoïdien	0.1	0.25	ns
	Score rainure du digastrique	0.4 [0-2]	1.13 [0-2]	0.034
Conduit auditif externe	Hauteur du mur	0.6	0.88	ns
	Pas de trou	0.5	0.75	ns
	Pas de cellule résiduelle	0.4	0.75	ns
	Score conduit auditif externe	1.5 [0-2]	2.38 [1-3]	0.027
Nerf facial	Identification du nerf au foramen stylomastoïdien	0.2	0.88	0.007
	Pas d'exposition de la gaine	0.5	0.63	ns
	Score nerf facial	0.7 [0-2]	1.51 [1-2]	0.045
Score de performance (sur 20)		11.4 [7-15]	14.3 [10-17]	0.02

2.2 Echelle d'évaluation de la technique Task-Based Checklist

L'évaluation de la technique montrait une supériorité significative pour le groupe « simulation » ($p = 0.002$) avec un score moyen de technique de 16.7 [14-19] sur 21, comparativement à 13.1 [9-16] pour le groupe « sans simulation » (Figure 19).

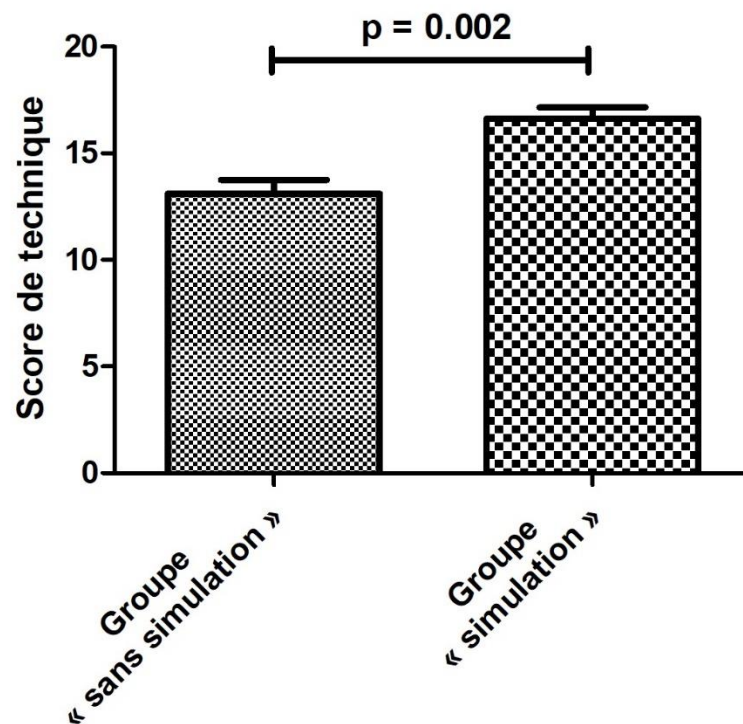


Figure 19 : Task-Based Checklist : score de technique (sur 21 points).

En étudiant en détail le score moyen de technique obtenu pour chaque structure, il existe une supériorité significative du groupe « simulation » par rapport au groupe « sans simulation » pour le fraisage de la corticale (4.4 [3-6] vs 2.4 [1-3] ; $p = 0.001$) (Figure 20).

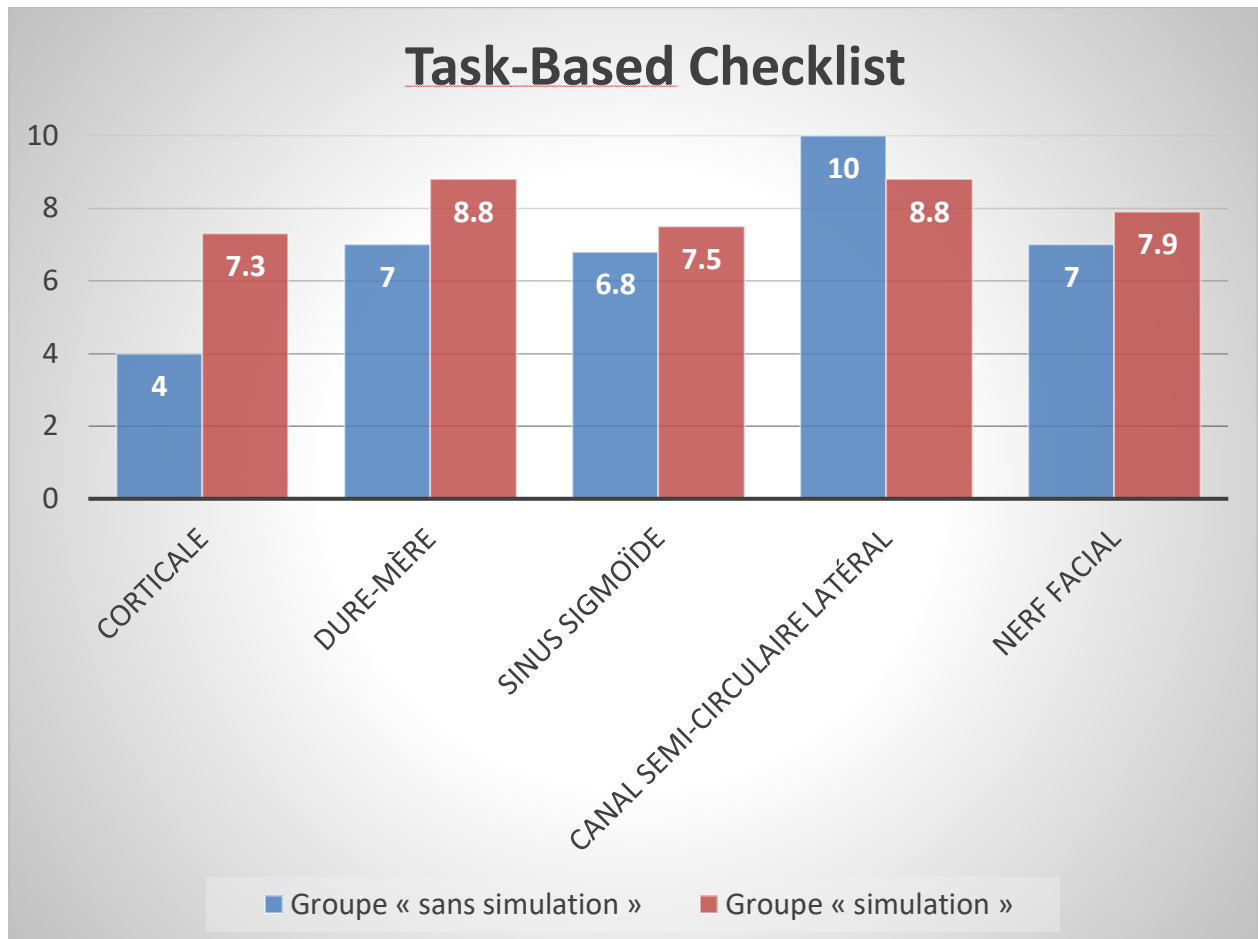


Figure 20 : Task-Based Checklist : score de technique pour le fraisage des différentes structures (score rapporté sur 10 points).

Le Tableau 8 ci-après résume le score moyen obtenu sur 21 dans les deux groupes pour chaque item de l'échelle d'évaluation de la technique Task-Based Checklist, et le p correspondant.

Task-Based Checklist : Items		Groupe « sans simulation »	Groupe « simulation »	P
Corticale	Choix d'une fraise appropriée	1	1	ns
	Bonne orientation osseuse	0.1	0.38	ns
	Fraisage avec des mouvements larges	0.3	0.63	ns
	Fraisage avec des mouvements long et doux	0.2	0.88	0.007
	Bonne entame initiale de la mastoïdectomie	0.7	0.88	ns
	Bon fraisage continu	0.1	0.63	0.026
	Score corticale	2.4 [1-3]	4.4 [3-6]	0.001
Dure-mère	Découverte à un moment appropriée de la dissection	0.9	0.88	ns
	Utilisation d'une technique de fraisage appropriée pour trouver la dure-mère	0.3	0.88	0.02
	Sélection d'une fraise appropriée	0.7	1	ns
	Dissection parallèle au tegmen avant de le découvrir	0.7	0.88	ns
	Exposition progressive du tegmen à partir du point de découverte	0.8	0.75	ns
	Visualisation de la tête de la fraise durant l'exposition du tegmen	0.8	0.88	ns
	Score dure-mère	4.2 [2-6]	5.27 [3-6]	ns
Sinus sigmoïde	Utilisation d'une technique de fraisage appropriée	0.5	0.63	ns
	Utilisation d'une fraise appropriée	0.7	0.88	ns
	Dissection parallèle au sinus sigmoïde avant de le découvrir	0.9	0.75	ns
	Exposition progressive du sinus sigmoïde à partir du point de découverte	0.5	0.5	ns
	Visualisation de la tête de la fraise durant l'exposition du sinus sigmoïde	0.8	1	ns
	Score sinus sigmoïde	3.4 [2-5]	3.76 [2-5]	ns
Canal latéral	Enclume trouvée après la reconnaissance du canal semi-circulaire latéral	1 [1-1]	0.88 [0-1]	ns
Nerf facial	Grossissement approprié pour identifier le nerf facial	1	1	ns
	Bonne orientation de la mastoïde pour optimiser la vision du nerf	0.8	1	ns
	Technique de fraisage utilisée appropriée	0.3	0.38	ns
	Score nerf facial	2.1 [1-3]	2.38 [2-3]	ns
Score de technique (sur 21)		13.1 [9-16]	16.7 [14-19]	0.002

2.3 Autres données relevées lors de la dissection

Nous avons relevé dans chaque groupe les variations anatomiques pouvant rendre la mastoïdectomie difficile :

- Dans le groupe « sans simulation », 40 % des OT cadavériques présentaient des variations : 2 avaient une mastoïde très dense, 2 avaient une procidence du sinus sigmoïde ;
- Dans le groupe « simulation », 25 % des OT cadavériques présentaient des variations : 1 avait une procidence de la méninge, 1 avait une rigidité cadavérique importante empêchant de tourner correctement la tête.

Nous avons également relevé dans chaque groupe les lésions des éléments nobles (Tableau 9).

Lésions des structures nobles	Groupe « sans simulation »	Groupe « simulation »	TOTAL
Lésions cérébro-méningées	1 lésion du cervelet 2 lésions de la méninge	0	3
Lésions vasculaires	3 lésions du sinus sigmoïde	1 lésion du sinus sigmoïde 1 lésion du golfe de la jugulaire	5
Lésions nerveuses	5 lésions du nerf facial	3 lésions du nerf facial	8
Lésions labyrinthiques	1 ouverture du canal semi-circulaire latéral	1 ouverture du canal semi-circulaire latéral	2
TOTAL	12	6	18

Tableau 9 : Lésions des structures nobles dans chaque groupe lors de la mastoïdectomie sur os temporal cadavérique.

En résumé, nous avons relevé pour le groupe « sans simulation » : 30 % de lésions cérébro-méningées, 30 % de lésions vasculaires, 50 % de lésions nerveuses, et 10 % de lésions labyrinthiques. Pour le groupe « simulation » nous avons noté : aucune lésion cérébro-méningée, 25 % de lésions vasculaires, 37.5 % de lésions nerveuses, et 25 % de lésions labyrinthiques.

Les différents temps chirurgicaux de la mastoïdectomie ont pu être terminés par 80 % des internes du groupe « sans simulation » (les 20 % restants n'ont pas eu le temps de trouver le nerf facial), et par 100 % des internes du groupe « simulation ».

De plus, 30 % des internes du groupe « sans simulation » et 50 % des internes du groupe « simulation » ont pu réaliser une tympanotomie postérieure.

3. Evaluation lors de la simulation virtuelle

Lors des séances sur simulateur en réalité virtuelle, les données étaient recueillies sur les 9 internes ayant participé.

En comparant les données relevées pour chaque interne au cours des trois mastoïdectomies consécutives, nous n'avons pas mis en évidence d'amélioration significative du temps de fraisage : 51 minutes lors du premier fraisage, 43 minutes au deuxième, et 42 minutes au troisième fraisage.

Nous avons pu constater une diminution significative du nombre de lésions de certains éléments nobles. Les lésions les plus fréquentes étaient celles du conduit auditif externe, du sinus sigmoïde et de la dure-mère. Concernant les lésions du conduit auditif externe, il y avait une diminution significative du nombre de lésions de – 82 % entre la deuxième et la troisième séance de simulation (5.6 [0-9] VS 1 [0-5] ; $p = 0.042$). De même pour le sinus sigmoïde, il existait une diminution significative du nombre de lésions de – 87 % entre la deuxième et la troisième mastoïdectomie (5.9 [0-26] VS 0.8 [0-6] ; $p = 0.049$), et de – 84 % entre la première et la troisième mastoïdectomie (4.8 [0-16] VS 0.8 [0-6] ; $p = 0.031$). Enfin, concernant la dure-mère, il y avait une diminution significative du nombre de lésions de – 45 % entre la première et la deuxième séance de simulation (4.3 [0-15] VS 2.3 [0-13] ; $p = 0.031$), et de – 65 % entre la première et la troisième séance (4.3 [0-15] VS 1.5 [0-8] ; $p = 0.035$). Nous n’avons pas relevé de différence significative du nombre de lésions des autres éléments nobles (nerf facial, corde du tympan, osselets, canal semi-circulaire latéral, cerveau), ni de la durée durant laquelle la fraise n’était pas visualisée par l’opérateur (Figure 21).

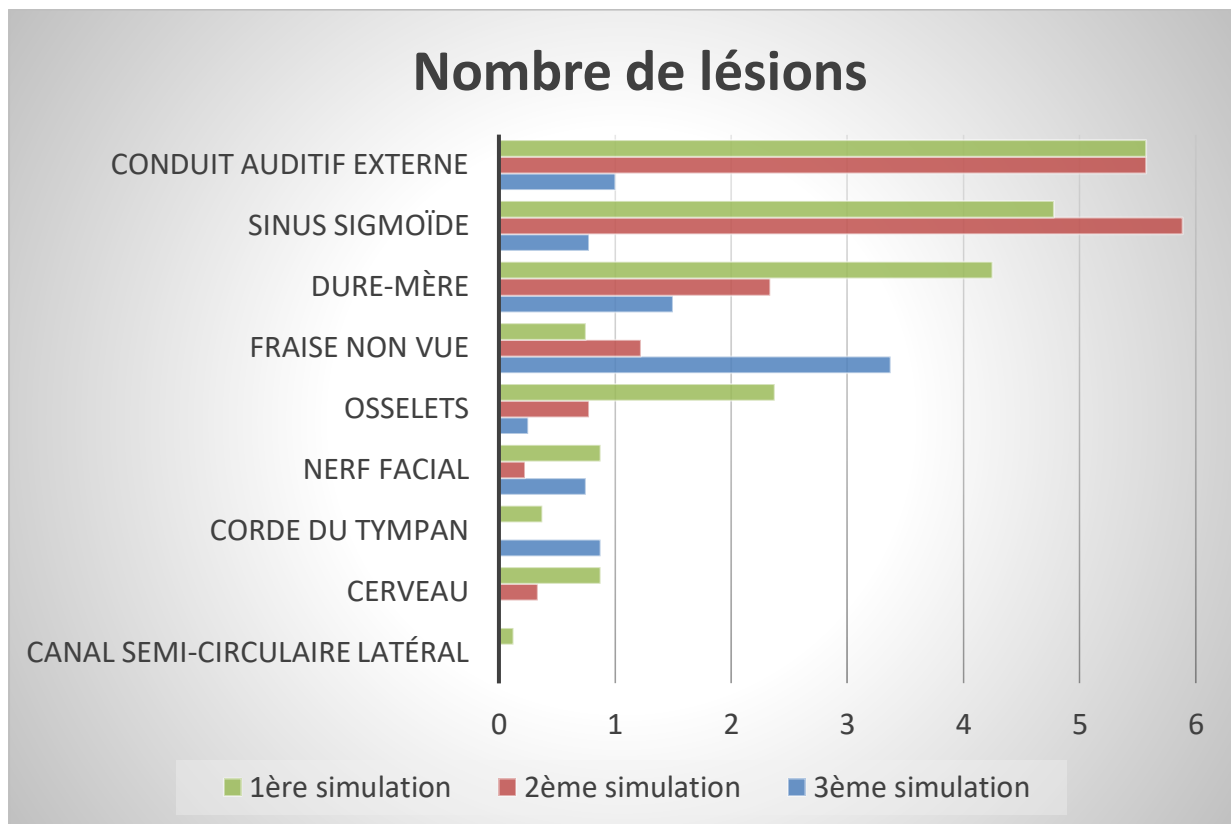


Figure 21 : Evolution du nombre de lésions des éléments nobles au cours des trois séances d’entraînement à la mastoïdectomie en simulation virtuelle.

Nous avons mis en évidence une progression des internes au niveau du score lésionnel calculé par le simulateur en fin de fraisage entre la première et la troisième séance de simulation, avec une diminution significative de ce score de - 60 % (103.3 [41-361] VS 41.1 [0-119] ; $p = 0.031$) (Figure 22).

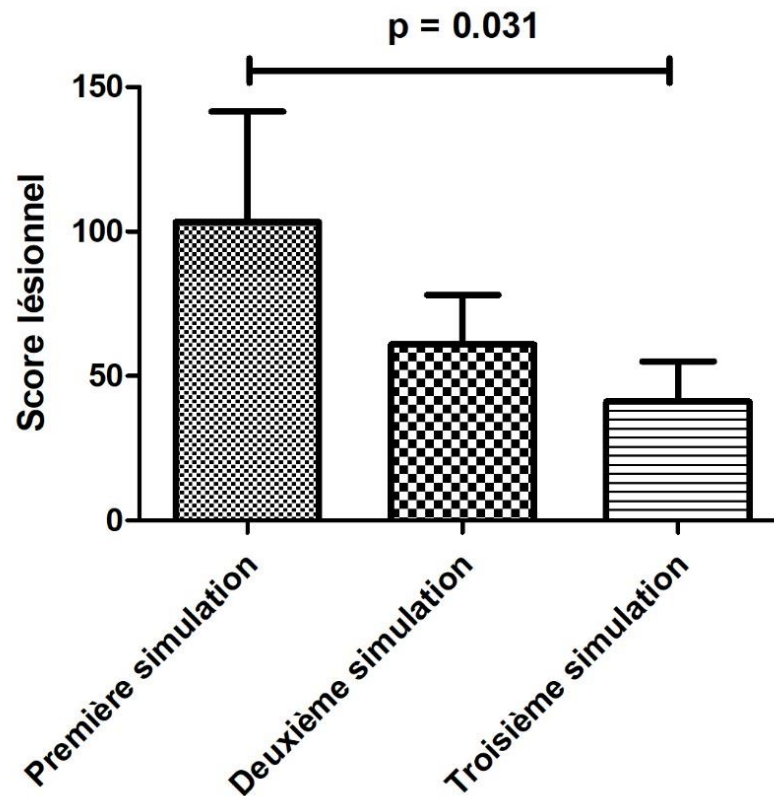


Figure 22 : Evolution du score lésionnel au cours des trois séances d'entraînement à la mastoïdectomie en simulation virtuelle.

Le pourcentage d'internes ayant réalisé une tympanotomie postérieure était significativement supérieur de + 167 % entre le deuxième et le troisième fraisage (33 % VS 89 %, $p = 0.037$), et également de + 167 % entre le premier et le troisième fraisage (33 % VS 89 %, $p = 0.037$) (Figure 23).

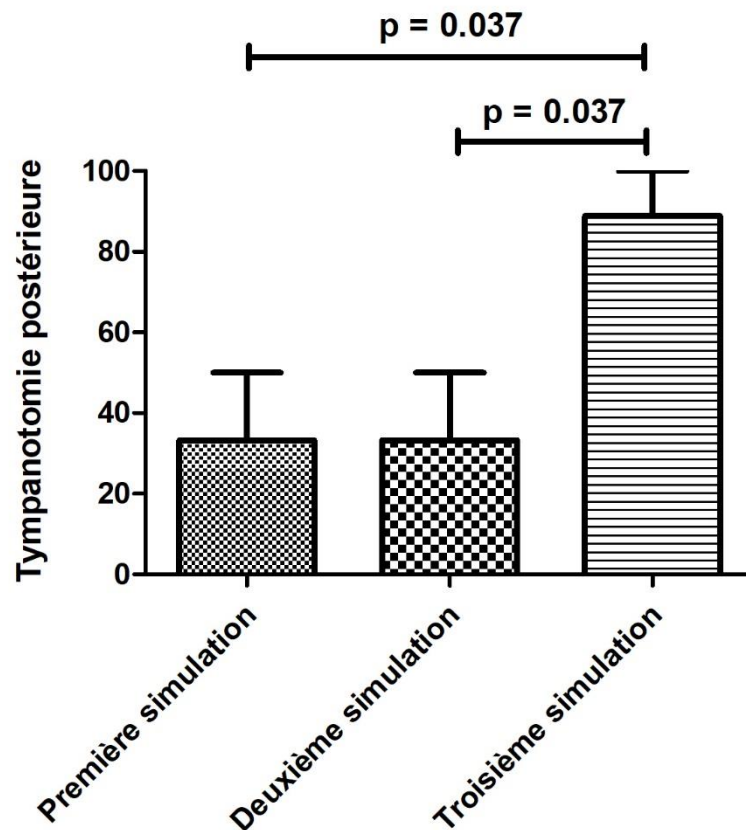


Figure 23 : Evolution du pourcentage de réalisation d'une tympanotomie postérieure au cours des trois séances d'entraînement à la mastoïdectomie en simulation virtuelle.

4. Comparaison dissection et simulation virtuelle

Nous pouvons voir sur la Figure 24 deux exemples du résultat final d'une mastoïdectomie sur OT cadavérique et sur simulateur en réalité virtuelle.

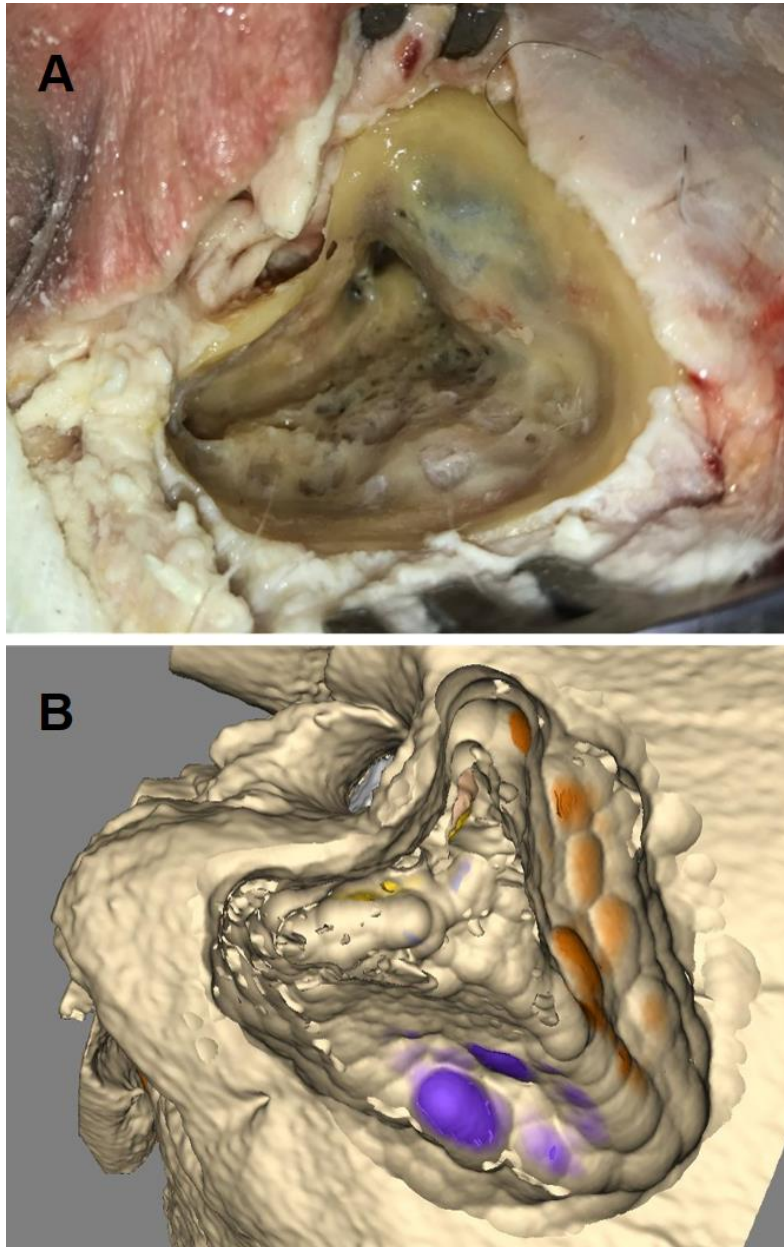


Figure 24 : Exemple de mastoïdectomie gauche.

A. Sur os temporal cadavérique.

B. Sur simulateur en réalité virtuelle.

Les internes estimaient la difficulté qu'ils rencontraient au fraisage des différents éléments de la mastoïde par une note sur 10 (0 = facile ; 10 = difficile). Les notes données pour la difficulté globale du fraisage étaient comparables pour une mastoïdectomie en dissection et en simulation virtuelle (5 [2.7-8] vs 4.8 [3-7.2] ; $p = 0.80$). Les notes attribuées pour chaque élément anatomique sont détaillées dans la Figure 25.

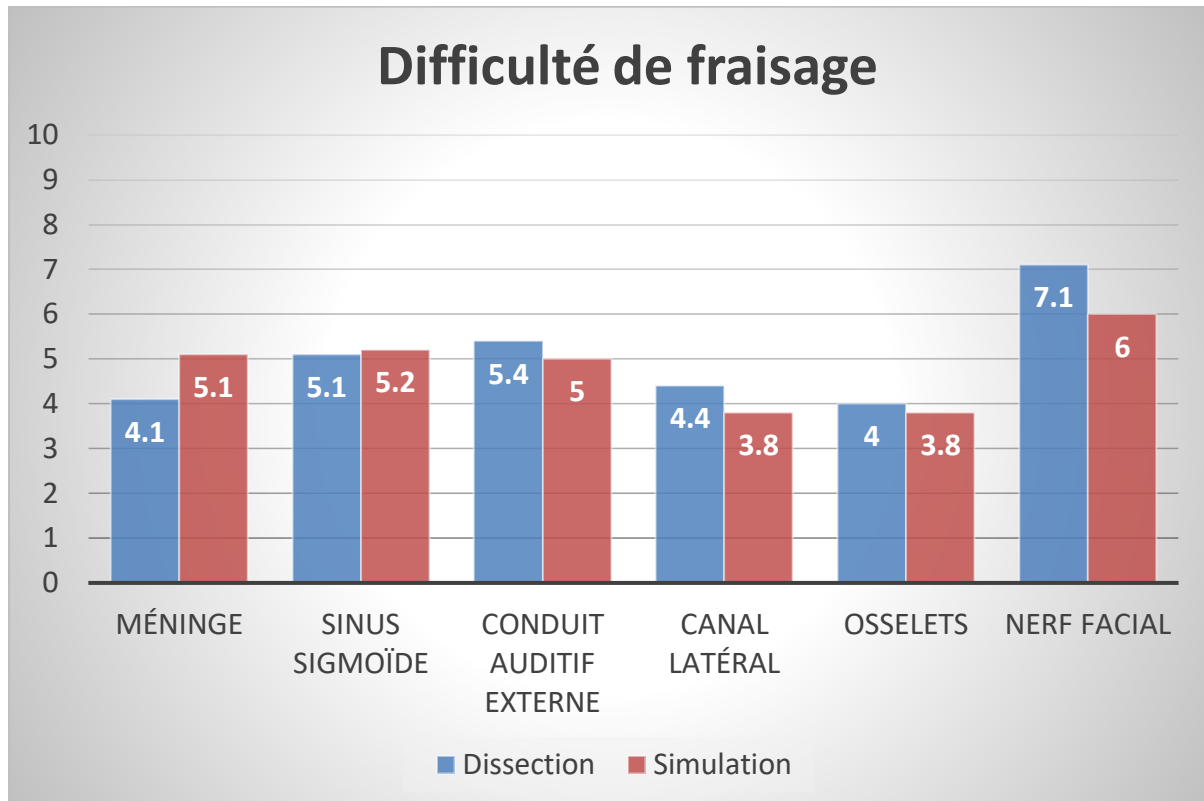


Figure 25 : Evaluation par les internes de la difficulté de fraisage des différents éléments de la mastoïde en dissection et en simulation virtuelle.

Les internes estimaient également la ressemblance anatomique des différents éléments de la mastoïde par rapport à une mastoïde d'un patient au bloc opératoire par une note sur 10 (0 = différent ; 10 = ressemblant). Les notes données pour la ressemblance anatomique globale étaient comparables pour un OT cadavérique et pour une mastoïde en simulation virtuelle (7.2 [1.8-9.8] vs 6.8 [4-9.2] ; $p = 0.45$). En revanche, le canal semi-circulaire latéral était estimé significativement plus proche de la réalité sur un OT cadavérique qu'en simulation virtuelle (7.7 [2-10] vs 5.9 [3-9] ; $p = 0.04$). Les notes attribuées pour chaque élément anatomique sont détaillées dans la Figure 26.

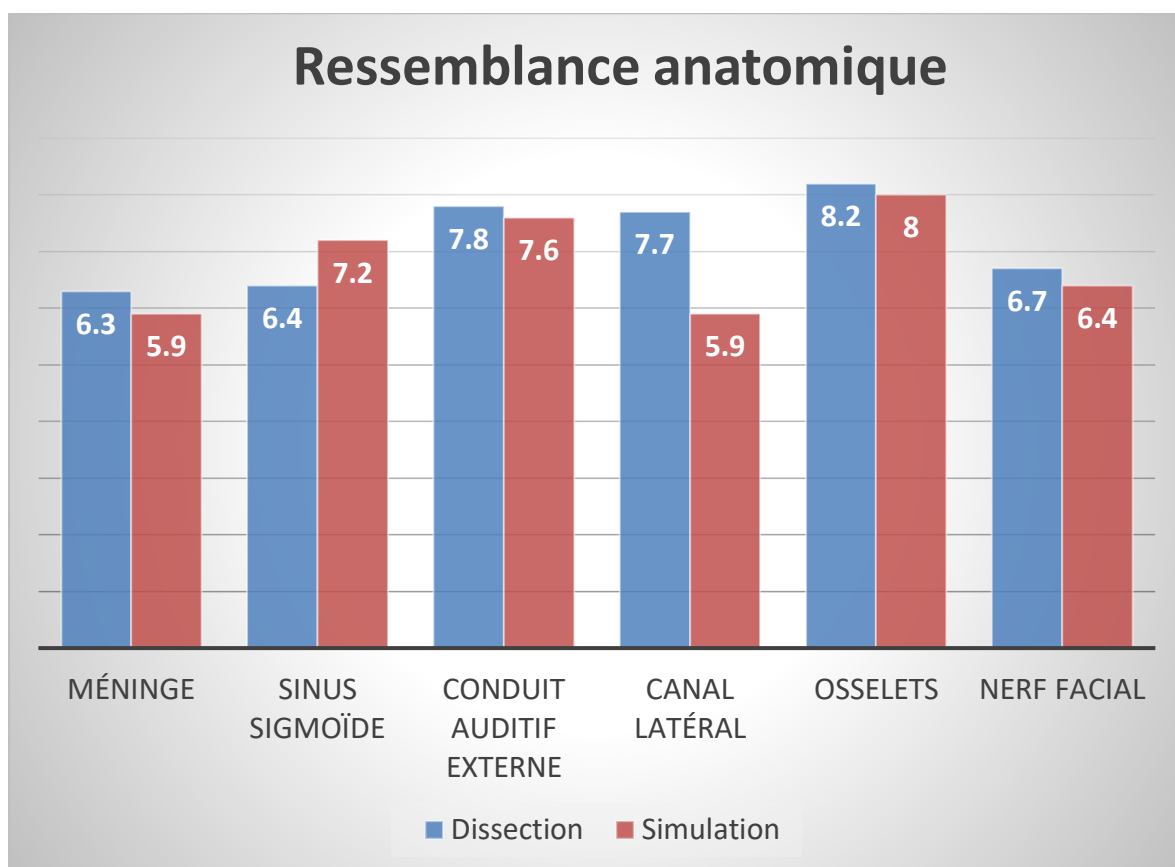


Figure 26 : Evaluation par les internes de la ressemblance anatomique par rapport à un patient au bloc opératoire des différents éléments de la mastoïde en dissection et en simulation virtuelle.

Les participants estimaient la qualité du matériel utilisé pour la réalisation de leur mastoïdectomie par une note sur 10. Les notes données étaient comparables pour le matériel de dissection et pour le matériel de simulation en réalité virtuelle (7.8 [5-10] vs 7.2 [5.6-8.9] ; $p = 0.37$). Les détails de ces notes sont exposés dans la Figure 27. Il faut noter que le taux de bug du logiciel utilisé durant les séances d'entraînement sur simulateur virtuel était de 78 %, le problème était le plus souvent lié à un blocage ou une perte du retour de force des instruments (fraise et/ou aspiration).

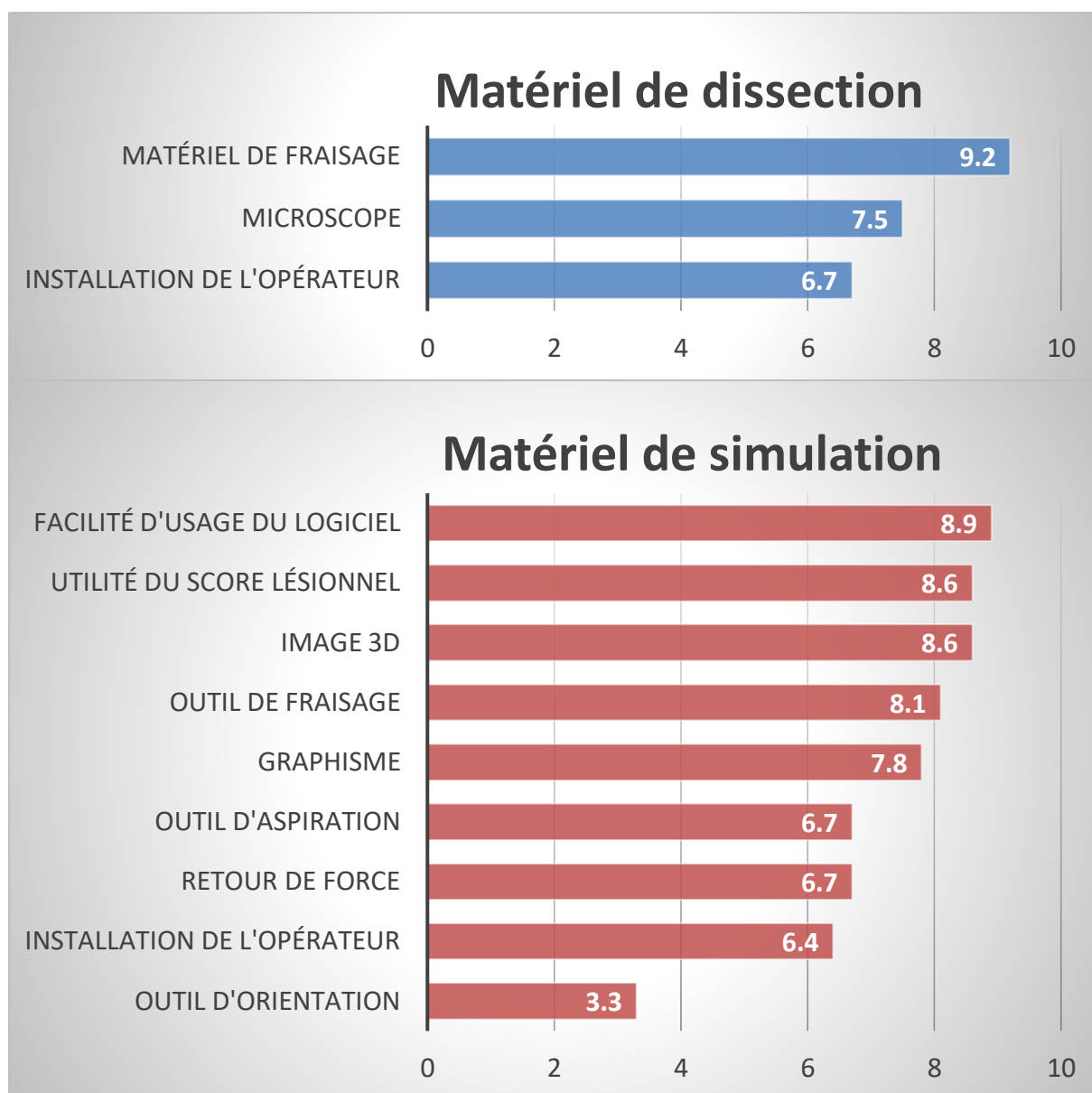


Figure 27 : Evaluation pas les internes de la qualité du matériel de dissection et de simulation en réalité virtuelle.

Les internes donnaient une note sur 10 de satisfaction globale sur l'amélioration de leur technique chirurgicale et de leurs connaissances en anatomie suite à leur participation aux séances d'entraînement à la mastoïdectomie. Les notes de satisfaction étaient comparables suite à une séance d'entraînement à la mastoïdectomie en dissection et en simulation virtuelle (9.1 [6.5-10] vs 8.9 [8-10] ; $p = 0.55$) (Figure 28).

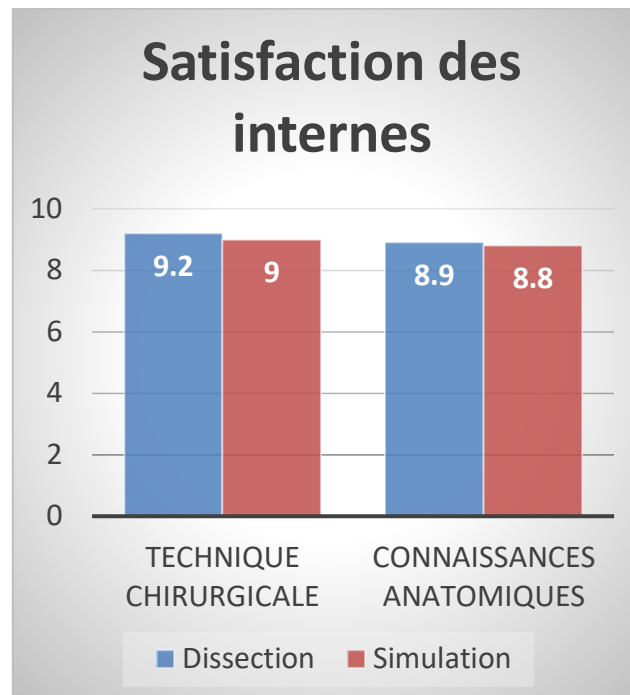


Figure 28 : Satisfaction des internes suite à leur participation à une séance d'entraînement à la mastoïdectomie en dissection et en simulation virtuelle.

Les internes se sentaient davantage en confiance pour réaliser une mastoïdectomie au bloc opératoire suite à cette étude à 86.3 % dans le groupe « sans simulation », et à 87.5 % dans le groupe « simulation ».

100 % des internes ayant participé à une séance d'entraînement à la mastoïdectomie en dissection conseillaient cette formation à un(e) collègue, et pensaient qu'il serait bénéfique qu'elle fasse partie du cursus pour tout interne d'ORL. Il en était de même pour la simulation virtuelle.

DISCUSSION

1. Analyse des résultats

1.1 Objectif principal

L'objectif principal de notre étude était d'évaluer l'intérêt de la simulation en réalité virtuelle pour l'apprentissage de la mastoïdectomie, en comparant les scores de performance (Welling Scale) et de technique (Task-Based Checklist) obtenus lors de la réalisation d'une mastoïdectomie sur rocher cadavérique chez des internes d'ORL novices ayant bénéficié ou non d'un entraînement sur le simulateur en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo®.

L'évaluation de la performance, mesurée via l'échelle d'évaluation Welling Scale lors de la dissection sur OT cadavérique, mettait en évidence une supériorité significative de la performance pour le groupe « simulation » ($p = 0.02$) : les internes de ce groupe obtenaient un meilleur score notamment pour le fraisage de la rainure du digastrique ($p = 0.034$), du conduit auditif externe ($p = 0.027$), et du nerf facial ($p = 0.045$). Ces temps chirurgicaux ne sont généralement pas les mieux maîtrisés par les jeunes internes d'ORL. Nous pouvons en déduire que, les bases du fraisage étant mieux acquises chez les internes du groupe « simulation » grâce à leurs séances d'entraînement sur simulateur, ils pouvaient se concentrer sur des tâches plus complexes.

L'évaluation de la technique, mesurée via l'échelle d'évaluation Task-Based Checklist pendant la dissection sur rocher de cadavre, montrait également une supériorité significative de la technique de fraisage pour les internes du groupe « simulation » ($p = 0.002$) : leurs scores étaient meilleurs pour le fraisage de la corticale ($p = 0.001$), et pour la technique de fraisage de la dure-mère ($p = 0.02$). Les internes du groupe « simulation » semblaient avoir plus d'assurance dès le début du fraisage, réalisant un fraisage continu avec des mouvements larges.

Ces résultats sont en faveur d'une amélioration de la performance et des compétences techniques pour la réalisation d'une mastoïdectomie sur rocher cadavérique chez des internes d'ORL novices ayant bénéficié d'un entraînement sur simulateur en réalité virtuelle.

Concernant les autres données relevées lors de la dissection : les internes du groupe « simulation » ont tous pu terminer leur mastoïdectomie dans les temps, alors qu'ils étaient plus nombreux dans ce groupe à avoir réalisé une tympanotomie postérieure et donc un temps opératoire supplémentaire, ce qui montre qu'ils étaient plus rapides suite à l'entraînement sur simulateur. Il semble qu'ils faisaient également moins de gestes dangereux lors du fraisage car nous avons comptabilisé deux fois moins de lésions des structures nobles dans le groupe « simulation », mais il faut noter que les OT cadavériques de ce groupe présentaient moins de variations anatomiques, ce qui a pu les avantager par rapport à l'autre groupe.

1.2 Objectifs secondaires

- *Evaluer les connaissances et l'expérience des internes d'ORL novices concernant le domaine de la simulation en santé :*

La grande majorité des participants connaissait l'existence de la simulation dans le domaine de la santé, et avait déjà eu l'occasion de participer à une séance de simulation. Ces séances de simulation étaient le plus souvent appliquées à des formations non chirurgicales souvent proposées en début d'internat (urgences, réanimation, annonce diagnostique). Les internes étaient tous très satisfaits de cet apprentissage en simulation, quel que soit le thème de la formation proposée.

En revanche, pas loin de la moitié des participants ne connaissaient pas l'existence de la simulation en réalité virtuelle pour le fraisage du rocher. Pourtant, nous avons vu que les simulateurs pour la chirurgie du rocher étaient les plus représentés en ORL (42,43). Il semblerait que la communication autour de la simulation virtuelle pour la chirurgie otologique

soit à améliorer, puisque des internes de la spécialité concernée n'ont pas encore connaissance de l'existence d'un tel simulateur.

Les participants pensaient à l'unanimité que la simulation avait un réel intérêt pour la formation en santé. Cependant, nous avons constaté que très peu d'entre eux préparaient leurs interventions à l'aide de la simulation, du fait qu'ils avaient difficilement accès à un simulateur virtuel. Il existe vraisemblablement, en plus d'un problème de communication, un problème d'accès au simulateur virtuel pour la chirurgie otologique. Si nous prenons l'exemple du VOXEL-MAN Tempo®, seulement 3 villes de formation en France en sont équipées : Paris (Faculté de Médecine du Kremlin-Bicêtre), Nancy (Ecole de Chirurgie de Nancy-Lorraine) et Toulouse.

- *Evaluer la progression des internes au cours de séances successives d'entraînement à la mastoïdectomie sur le simulateur en réalité virtuelle :*

Nous avons pu constater une diminution significative du nombre de lésions de certains éléments nobles : le conduit auditif externe, le sinus sigmoïde, et la dure-mère. Nous avons également mis en évidence une progression significative des internes au niveau du score lésionnel calculé par le simulateur en fin de fraisage, et du nombre d'internes ayant réalisé une tympanotomie postérieure. Il faut prendre en considération le fait que le troisième rocher fraisé avait une anatomie plus difficile que les deux premiers, ce qui valorise d'autant plus ces résultats. Nous avons pu remarquer que les lésions les plus fréquentes étaient celles du conduit auditif externe, qui apparaissaient le plus souvent au moment de la réalisation de la tympanotomie postérieure. Dans l'étude de Varoquier et al., les lésions de la paroi postérieure du conduit auditif externe étaient également les plus fréquentes chez les chirurgiens novices, et il s'agissait de la seule structure anatomique où une différence significative du nombre de lésions était mise en évidence entre les novices et les experts (71).

En revanche, nous n'avons pas mis en évidence de diminution significative du temps de fraisage, mais il existait une tendance. Nous avons vu que le nombre de tympanotomie postérieure augmentait au cours des séances de simulation, représentant un temps opératoire supplémentaire. Malgré cela nous avons quand même une tendance à la diminution du temps de fraisage, ce qui nous laisse penser que les internes étaient plus rapides au fur et à mesure des simulations à la réalisation de la mastoïdectomie seule. D'après Shahrestani et al., le

temps de fraisage est un paramètre de mesure de la performance fiable pour l'entraînement à la mastoïdectomie (84). Nous avons aussi remarqué que la durée durant laquelle la fraise n'était pas visualisée par l'opérateur avait tendance à augmenter au fur et à mesure des simulations, proportionnellement à l'augmentation du nombre de tympanotomie postérieure. Ce résultat peut être dû à l'augmentation de la prise de risque que représente une tympanotomie postérieure, mais cela reste une hypothèse car le logiciel ne précise pas dans les données relevées en fin de fraisage à quel endroit de la mastoïde la fraise n'était plus visible. Nous n'avons pas constaté de diminution significative du nombre de lésions pour les autres structures nobles : il y avait cependant une tendance pour les osselets, et les autres structures nobles étaient très peu lésées (nerf facial, corde du tympan, cerveau, canal semi-circulaire latéral).

L'interprétation de l'ensemble de ces résultats est en faveur d'une progression des internes dans la gestuelle opératoire et dans l'appréhension de l'environnement opératoire au fur et à mesure des séances de simulation sur le VOXEL-MAN Tempo®.

- *Evaluer les défauts de performance et de technique des internes d'ORL novices lors d'une séance d'entraînement à la mastoïdectomie sur rocher cadavérique, pouvant être améliorés pour leur pratique future au bloc opératoire :*

En reprenant les différents temps opératoires que les internes devaient réaliser pour leur mastoïdectomie sur rocher cadavérique, leurs principales lacunes selon nos observations lors de cette étude sont les suivantes :

1) *Initiation du triangle de fraisage* : l'incision cutanée n'était pas suffisamment prolongée en haut et en avant du conduit auditif externe.

2) *Squelettisation de la dure-mère et du sinus sigmoïde* : le fraisage n'était pas continu et les mouvements de fraisage n'étaient pas suffisamment larges, la mastoïdectomie n'était pas suffisamment prolongée en haut et en avant du conduit auditif externe, l'angle sino-dural n'était pas assez dégagé.

3) *Amincissement de la paroi postérieure du conduit auditif externe* : soit le conduit auditif externe n'était pas assez aminci, soit son amincissement était mal contrôlé et conduisait à des trous dans sa paroi postérieure.

4 et 5) *Repérage du canal semi-circulaire latéral, de la courte apophyse de l'enclume et de l'articulation incudo-malléaire* : les changements de fraise ne se faisaient pas au bon moment (la fraise était de trop gros diamètre ou non diamantée à l'approche du canal semi-circulaire latéral et de l'enclume).

6) *Repérage de la crête digastrique* : ce point était sans doute le plus problématique (seulement la moitié des internes l'ont identifiée, même s'il est vrai que la crête digastrique n'est pas toujours évidente à repérer sur un rocher de cadavre).

7) *Repérage de la troisième portion du nerf facial sur toute sa longueur* : cette étape était peu maîtrisée (la note la plus élevée que les internes ont attribuée pour la difficulté rencontrée lors du fraisage sur OT cadavérique était pour le nerf facial).

Il semble important que les chirurgiens seniors qui encadrent les jeunes internes d'ORL au bloc opératoire et leur enseignent la technique chirurgicale de la mastoïdectomie connaissent leurs principaux points faibles aux différents temps opératoires, afin de pouvoir anticiper les erreurs et améliorer leurs performances chirurgicales.

- *Evaluer la satisfaction des internes après les séances d'entraînement à la mastoïdectomie sur simulateur virtuel et sur rocher cadavérique, et les aspects à améliorer de chaque support :*

Les internes ont donné une très bonne note de satisfaction suite aux séances de dissection sur simulateur et sur cadavre, aussi bien pour l'apprentissage de la technique chirurgicale que pour l'enseignement de l'anatomie. Ils considéraient tous qu'il serait bénéfique qu'une telle formation à la mastoïdectomie fasse partie du cursus pour tout interne d'ORL, que ce soit pour la simulation virtuelle ou pour la dissection cadavérique. Ces résultats positifs sont en accord avec les résultats obtenus dans la littérature concernant les validités de contenu pour ces deux supports de simulation (44,70–73).

Concernant le simulateur virtuel VOXEL-MAN Tempo®, plusieurs éléments étaient à améliorer d'après les participants. L'outil d'orientation était ce qui a le plus posé problème, car il était trop sensible et donc difficile à maîtriser. Le retour de force pouvait également être amélioré, ce problème est récurrent dans les études de validité de surface du VOXEL-MAN Tempo® (67,70,71). En effet, plusieurs bugs se sont produits durant les séances de

simulation : soit les instruments de fraisage ou d'aspiration restaient bloqués dans la mastoïde, soit ils traversaient l'os à cause d'une perte transitoire du retour de force. L'installation de l'opérateur pour le fraisage était différente sur le simulateur par rapport aux conditions réelles, car l'écran d'ordinateur était installé face à l'opérateur de façon verticale, alors qu'au bloc opératoire le patient est allongé à l'horizontale. Enfin, au niveau anatomique, le canal semi-circulaire latéral du rocher sur le simulateur était considéré comme peu ressemblant à celui d'un rocher sur patient réel : il apparaissait comme une ligne bleue sur le simulateur, alors qu'en réalité il faut s'attendre à retrouver une structure lisse arrondie et plus dense que l'os mastoïdien, la ligne bleue étant le stade évolué lorsqu'il y a une lyse du canal semi-circulaire.

Concernant la dissection sur rocher cadavérique, l'installation de l'opérateur posait également problème : ni les tabourets ni la table ne pouvaient monter ou descendre, et la rigidité cadavérique empêchait parfois de tourner suffisamment la tête du patient. L'opérateur pouvait donc se retrouver dans des positions inconfortables, notamment pour des temps opératoires nécessitant une vue rasante.

2. Caractéristiques de la population

Cette étude prospective et comparative a inclus 20 internes d'ORL en troisième semestre provenant de six villes d'internat différentes (Paris, Rouen, Caen, Amiens, Tours, Reims), dont 2 internes ont été exclus du groupe « simulation » car ils n'ont pas pu participer à toutes les séances d'entraînement et de dissection.

Les deux groupes étaient comparables entre eux concernant : le ratio homme / femme, l'âge moyen des participants, le nombre de semestres passés en ORL, leur expérience en matière de fraisage, et leurs connaissances anatomiques en chirurgie otologique.

La seule différence retrouvée entre les deux groupes était le fait que les internes du groupe « simulation » se sentaient mieux préparés pour effectuer une mastoïdectomie sur cadavre que les internes du groupe « sans simulation », ce qui peut refléter l'effet bénéfique des séances d'entraînement sur le simulateur.

3. Limites de l'étude

3.1 Population

Notre étude portait sur un faible effectif : 18 internes au total, dont 8 dans le groupe « simulation » et 10 dans le groupe « sans simulation ». D'autres études dans la littérature avaient pour objectif d'évaluer l'intérêt d'un simulateur pour l'apprentissage de la mastoïdectomie, en comparant la performance en dissection sur rocher cadavérique entre deux groupes d'internes, dont l'un avait bénéficié d'un entraînement sur le simulateur. Zhao et al. étudiait l'intérêt du Mediseus Surgical Drilling Simulator® dans une étude portant sur 20 internes (64), Andersen et al. celui du Visible Ear Simulator® sur 40 internes (68), et Aussedat et al. étudiait l'intérêt du rocher synthétique Temp'Os® sur 34 internes (47). La population de notre étude a donc un effectif globalement plus faible que dans d'autres études similaires retrouvées dans la littérature.

Il y a plusieurs explications au faible effectif de notre étude. Le recrutement des participants s'est avéré compliqué à cause d'un problème de disponibilité des internes. En effet, nous avons constaté qu'il était parfois difficile pour les internes d'être absent du service pour pouvoir bénéficier de leurs journées de formation. Il était d'autant plus compliqué de recruter suffisamment d'internes pour le groupe « simulation » qui demandait une présence de un jour et demi, au lieu d'une demi-journée pour le groupe « sans simulation ». Cela explique que nous avons eu deux internes exclus de l'étude dans le groupe « simulation » car ils n'avaient pas pu participer à toutes les séances d'entraînement et de dissection. De plus, la contrainte de n'inclure que des internes en troisième semestre limitait le nombre d'internes à qui nous pouvions proposer de participer à cette étude. Pour tenter de palier à ce problème, nous avons élargi l'étude à un plus grand nombre de villes que prévu initialement.

De plus, nous avons choisi d'évaluer des internes du même semestre dans le but d'avoir un niveau homogène en chirurgie otologique entre les participants, ce qui n'était pas le cas dans les études citées précédemment portant sur de plus grands effectifs : Zhao et al. a sélectionné des internes dont certains n'avaient pas d'expérience préalable et certains avaient une expérience minimale (64), Andersen et al. a réalisé une étude portant sur des internes

entre la deuxième et la cinquième année (68), et Aussedat et al. sur des internes entre la première et la troisième année (47). L'étude devait donc porter sur des internes novices du même semestre. Comme elle avait lieu un semestre d'hiver, nous avons le choix entre sélectionner des internes en premier semestre ou en troisième semestre. Notre choix s'est porté sur des internes en troisième semestre, qui avaient donc peu d'expérience chirurgicale personnelle, mais avaient déjà eu l'occasion de voir des chirurgies du rocher au bloc opératoire. En effet, beaucoup d'internes en premier semestre ne sont pas encore passés en stage d'ORL, il aurait été compliqué de réaliser cette étude sur des internes n'ayant jamais vu une chirurgie du rocher. Avec la réforme du troisième cycle de l'internat, nous avons pensé qu'il serait facile d'obtenir un niveau homogène entre les internes, puisqu'ils ont l'obligation de réaliser durant leur première année de phase socle un stage en ORL et un stage hors filière. Mais nous nous sommes rendu compte que dans certaines villes cette maquette n'était pas respectée, puisque trois internes avaient effectué uniquement des stages en ORL durant leur première année. De plus, les internes parisiens ont des terrains de stage très spécialisés : ils peuvent aussi bien être passés dans un stage spécialisé en otologie et avoir déjà opéré plusieurs mastoïdes, ou bien dans un stage spécialisé en cancérologie et n'avoir vu aucune chirurgie du rocher. Nous avons tout de même constaté, malgré ces contraintes, que le niveau en chirurgie otologique entre les participants de notre étude était homogène.

3.2 Protocole de l'étude

Le principal biais de notre étude était que l'évaluation des internes lors de la séance de dissection sur rocher cadavérique n'était pas faite en aveugle. En effet, les évaluateurs étant également les organisateurs des séances d'entraînement sur simulateur et des séances de dissection sur cadavre, ils savaient quels internes avaient effectué un entraînement sur le simulateur.

Les rochers cadavériques sur lesquels les internes étaient évalués avaient une anatomie différente. Nous avons vu que certains rochers présentaient des variations anatomiques rendant la chirurgie plus compliquée, ce qui est d'autant plus difficile pour un interne novice. Les conditions de dissection sur rocher cadavérique pouvaient donc différer d'un interne à l'autre.

Les internes des deux groupes ont bénéficié d'un cours sur la mastoïdectomie, mais seuls les internes du groupe « simulation » ont bénéficié de séances d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle. Nos résultats montraient que les internes du groupe « simulation » obtenaient des scores de performance et de technique plus élevés lors de la dissection sur rocher de cadavre. Cependant, la simulation en réalité virtuelle n'était pas comparée dans notre étude à une autre technique d'entraînement. Nous pouvons donc nous demander si l'amélioration des performances de fraisage était due au simulateur lui-même, ou au fait d'avoir consacré plus de temps à travailler sur le sujet.

4. Intérêt du VOXEL-MAN Tempo® pour la formation

Dans notre étude, nous avons vu que les internes étaient favorables à l'unanimité à la formation en santé grâce à la simulation. En effet, ils ont exprimé leur intérêt pour la formation en simulation, aussi bien dans le questionnaire pré-formation que dans le questionnaire post-simulation virtuelle. L'opinion des internes sur l'intérêt du simulateur virtuel pour leur formation n'a donc pas été altérée suite à l'utilisation de celui-ci.

La plateforme de simulation en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo® présente plusieurs intérêts pour la formation en chirurgie otologique.

A l'inverse du rocher de cadavre, le simulateur en réalité virtuelle a l'avantage de ne pas nécessiter un laboratoire d'anatomie pour son utilisation, il peut être installé dans n'importe quelle structure. De plus, la disponibilité limitée des sujets anatomiques est une autre contrainte associée à ce support de simulation. La simulation en réalité virtuelle peut donc être pratiquée plus facilement, car elle présente moins de contraintes relatives à son accessibilité et à sa disponibilité. En revanche, il est nécessaire de prendre en compte la contrainte financière dû au coût élevé à l'achat d'une plateforme de simulation en réalité virtuelle, qui peut être un obstacle à l'acquisition d'un simulateur virtuel par les universités.

Le simulateur en réalité virtuelle offre la possibilité de réaliser des simulations à l'infini. Il s'agit d'un avantage non négligeable car plusieurs études montrent que les compétences chirurgicales sont améliorées grâce à la pratique répétée sur simulateur virtuel, que ce soit pour le VOXEL-MAN Tempo® (76,77) ou pour le Visible Ear Simulator® (65,85). Dans

notre étude, les internes ont réalisé trois simulations sur des rochers différents à chaque fois : une mastoïde avec une anatomie standard côté gauche, puis côté droit, puis une mastoïde plus difficile avec un os dense et un antrum étroit. La répétition des simulations sur des rochers différents permettait d'éviter le phénomène de familiarisation, et de garder une capacité d'adaptation dont le chirurgien doit faire preuve face à la variabilité anatomique des patients en conditions réelles.

Sur le simulateur virtuel VOXEL-MAN Tempo®, il est possible de choisir un modèle anatomique en particulier et de simuler une pathologie. Il propose sept rochers différents, plus ou moins pneumatisés, avec ou sans pathologie de l'oreille moyenne. Le but est de pouvoir travailler sur la variabilité qu'il existe entre les rochers humains, en termes d'anatomie et de pathologie.

Les supports en réalité virtuelle offrent la possibilité d'auto-formation et d'auto-évaluation. Concernant l'auto-formation, le VOXEL-MAN Tempo® permet d'avoir des avertissements sonores et visuels lorsque la fraise est proche des structures à risque, et une alerte est donnée lorsque ces structures sont blessées. Cette option permet de guider un interne novice pendant son fraisage. Concernant l'auto-évaluation, le VOXEL-MAN Tempo® génère automatiquement à chaque fin d'exercice plusieurs résultats permettant d'analyser la performance de fraisage, comme par exemple le score lésionnel. Un suivi de l'évolution de ses performances par l'interne au fur et à mesure des simulations est donc possible. De plus, chaque session est enregistrée et la vidéo peut être visualisée à distance. La possibilité d'auto-formation sur simulateur virtuel a apporté la preuve de son efficacité, aussi bien pour le Visible Ear Simulator® (68) que pour le Mediseus Surgical Drilling Simulator® (86).

Un autre avantage du VOXEL-MAN Tempo® est qu'il permet de simuler un rocher de patient réel. En effet, le module *VOXEL-MAN My Cases* du simulateur virtuel permet d'intégrer des modèles de rochers de patients à partir de leur scanner au format DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) en quelques minutes (78). Le simulateur en réalité virtuelle apparaît donc être un outil particulièrement intéressant pour la préparation d'une intervention chirurgicale, puisqu'il permet de réaliser des modèles virtuels sur mesure générés à partir de scanner de patient en pré-opératoire, et de simuler l'intervention une ou plusieurs fois avant d'opérer le patient. Cet outil peut intéresser les chirurgiens novices qui souhaitent réviser la technique opératoire et acquérir la gestuelle chirurgicale, mais aussi les chirurgiens confirmés lorsqu'ils sont confrontés à un cas opératoire qui s'annonce difficile. Arora et al. a étudié

l'intégration d'os temporaux cadavériques à partir de scanners sur le simulateur VOXEL-MAN Tempo®. Il a pu constater que les structures anatomiques osseuses étaient bien reproduites sur le modèle virtuel, contrairement aux tissus mous qui étaient moins bien représentés, rendant compliqué l'entraînement pour la chirurgie du cholestéatome par exemple (83).

5. Perspectives

5.1 Intégration de la simulation dans le curriculum des internes d'ORL

La simulation en réalité virtuelle est en plein essor, et tend à devenir un outil essentiel pour l'enseignement chirurgical. C'est actuellement déjà le cas dans plusieurs pays (38,40,41). Les domaines spécifiques de formation et d'évaluation dans lesquels la réalité virtuelle présente un intérêt en chirurgie sont l'assimilation des compétences techniques, la formation des équipes, l'acquisition des compétences décisionnelles, et la sécurité des patients (87).

Concernant l'apprentissage de la mastoïdectomie, nous pensons que la simulation en réalité virtuelle pourrait avoir sa place dans le curriculum des internes d'ORL. En effet, nous avons montré dans notre étude que l'entraînement sur le simulateur virtuel VOXEL-MAN Tempo® permettait une amélioration des performances de fraisage chez des internes novices lors de la réalisation d'une mastoïdectomie sur cadavre. D'autres études dans la littérature ont retrouvé des résultats similaires pour les simulateurs virtuels Mediseus Surgical Drilling Simulator® (64) et Visible Ear Simulator® (68), et pour le rocher synthétique Temp'Os (47) qui est un autre type de support de simulation. De plus, nous avons vu que la simulation en réalité virtuelle offrait la possibilité de répéter les simulations, de s'entraîner sur des modèles de rochers variés en termes d'anatomie et de pathologie, et également la possibilité d'auto-formation et d'auto-évaluation. La simulation virtuelle permet aussi de générer un rocher virtuel à partir du scanner d'un patient réel, ce qui s'avère très intéressant pour la préparation d'une intervention chirurgicale.

Dans une étude de 2017, Frithioff et al. a fait un état des lieux sur les méthodes d'apprentissage de la mastoïdectomie auprès de 23 pays d'Europe. La simulation en réalité

virtuelle et les rochers synthétiques étaient déjà utilisés dans de nombreux établissements. La diminution de la disponibilité des cadavres, la baisse des coûts de la simulation, ainsi que les preuves établies d'un effet positif de la simulation sur les compétences des internes, étaient les principales raisons invoquées. La plupart des autres établissements qui ne proposaient pas encore ces supports de simulation comptaient les intégrer dans le programme des internes pour l'enseignement de la chirurgie du rocher dans un futur proche (88).

Il reste à savoir comment la formation par simulation peut être intégrée dans le curriculum des internes en chirurgie, sur les plans organisationnel, administratif et logistique (89).

Nous avons réfléchi à un programme d'enseignement pour l'apprentissage de la chirurgie du rocher par la simulation, qui pourrait être intégré dans le curriculum de l'interne d'ORL en formation initiale (Figure 29). L'internat d'ORL a une durée de six ans depuis la réforme du troisième cycle. La simulation en réalité virtuelle pourrait être pratiquée en début d'internat, pendant les deux premières années, ce qui permettrait une première approche de l'anatomie chirurgicale et de la technique chirurgicale auprès d'internes ayant peu d'expérience en chirurgie otologique. Dans leurs études portant sur l'intérêt pédagogique des simulateurs en réalité virtuelle, Bennett et al. et Varoquier et al. ont montré que l'apprentissage de l'anatomie était l'élément le mieux noté (67,71). Introduire la simulation virtuelle en début d'internat semble donc judicieux. L'enseignement pourrait se faire d'abord de façon encadrée durant la première année, puis en auto-formation durant la seconde année. Nous pouvons même imaginer que pendant la période d'auto-formation les internes puissent travailler sur un simulateur virtuel disponible en téléchargement libre et avec du matériel simplifié, ce qui permettrait de délocaliser le simulateur virtuel. D'après Frenco et al., le fait de pouvoir délocaliser le simulateur virtuel augmenterait le temps consacré à la formation par les internes (90). Dans un second temps, la simulation sur rocher synthétique pourrait être intégrée au cours des troisième et quatrième année d'internat, auprès d'internes ayant déjà bénéficié d'une première approche de la chirurgie otologique par la réalité virtuelle et au bloc opératoire. Les internes pourraient alors approfondir leurs connaissances de la technique chirurgicale sur ce support de simulation synthétique présentant certains avantages par rapport au simulateur en réalité virtuelle, notamment en termes de validité physique et de conditions opératoires (13,91). La dissection sur rocher cadavérique, dont la disponibilité et l'accessibilité sont limitées et le coût important, reste malgré tout le meilleur support d'entraînement considéré depuis de nombreuses années comme le « gold standard »

pour l'apprentissage de la chirurgie du rocher (12,13). La dissection cadavérique serait donc réservée aux internes plus avancés de cinquième et sixième année d'internat, dont le but est de perfectionner leur technique chirurgicale. La formation pratique grâce à ces supports de simulation serait accompagnée tout au long de l'internat par la pratique de la chirurgie du rocher au bloc opératoire, dans un système de compagnonnage déjà en vigueur aujourd'hui.

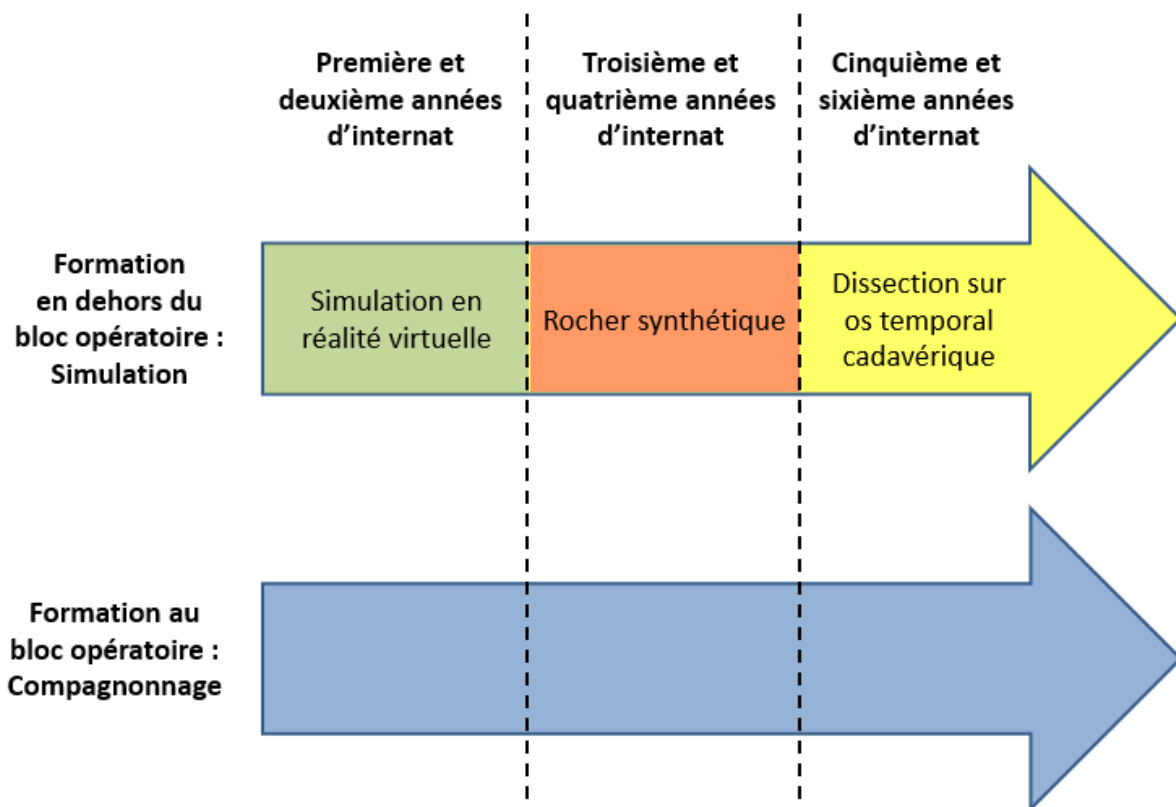


Figure 29 : Proposition d'un programme d'enseignement pour l'apprentissage de la chirurgie du rocher au cours de l'internat d'ORL.

Durant la formation initiale des internes en ORL, des examens pratiques peuvent être facilement mis en place grâce à la simulation virtuelle, en plus des examens théoriques déjà existants. En effet, nous avons vu que les séances de simulation sont enregistrées systématiquement sur le logiciel du simulateur virtuel. Elles peuvent donc être visionnées par un ou plusieurs évaluateurs, même à distance de la simulation, permettant de juger grâce aux enregistrements les éléments acquis par l'interne et ceux à améliorer.

La simulation en réalité virtuelle peut également avoir un intérêt pour des chirurgiens confirmés en formation continue, grâce à sa capacité à simuler un rocher de patient réel à partir de son scanner. Les chirurgiens confirmés ont donc la possibilité de fraiser des rochers de patients sur le simulateur virtuel en pré-opératoire, et de simuler l'intervention avant d'opérer le patient, ce qui peut s'avérer utile pour les cas opératoires difficiles.

Même pour les externes, la simulation en réalité virtuelle a montré son intérêt. En effet, Hardcastle et al. a constaté que l'expérience sur simulateur virtuel permettait d'aider les externes à orienter leur choix de carrière. Dans son étude, des étudiants en cinquième année de médecine ont assisté à un atelier sur l'utilisation d'un simulateur de RV pour la chirurgie du rocher. Les étudiants ont rempli un questionnaire pré-atelier et post-atelier portant sur leurs intérêts professionnels. Les résultats ont montré que l'expérience sur simulateur a été utile pour stimuler la réflexion des externes sur leurs plans de carrière, puisque la moitié des étudiants étaient plus intéressés par une carrière en ORL après cet atelier (sans recul sur leur choix définitif suite à cette étude). La réalité virtuelle peut donc être une façon ludique d'enseigner l'ORL ou d'autres spécialités aux externes, et de les aider dans leur choix de spécialité (92).

5.2 Validité de transfert du VOXEL-MAN Tempo®

La validité de transfert correspond à la capacité d'un simulateur à améliorer les performances en pratique réelle au bloc opératoire. Il s'agit d'une étape fondamentale dans la validation d'un simulateur, et la plus pertinente cliniquement. L'évaluation de la validité de transfert se fait grâce à des études contrôlées et randomisées, comparant les performances au

bloc opératoire de chirurgiens ayant suivi un enseignement par un simulateur aux performances de chirurgiens n'ayant pas suivi cet enseignement (3,4).

Les bénéfices du simulateur virtuel VOXEL-MAN Tempo® pour la chirurgie du rocher n'ont jamais été étudiés sur les performances des chirurgiens au bloc opératoire, ou sur les résultats auprès de leurs patients.

Dans notre étude, le transfert des compétences potentiellement acquises grâce au simulateur virtuel VOXEL-MAN Tempo® n'a pas été évalué sur les performances des internes au bloc opératoire, mais sur leurs performances de dissection sur le support de référence qu'est le rocher de cadavre.

Dans d'autres études portant sur le VOXEL-MAN Tempo®, des chirurgiens experts ont attribué une note moyenne à la capacité de transfert des connaissances acquises sur ce simulateur virtuel au bloc opératoire (70,71). Mais il s'agit d'un avis d'experts, et non pas d'une étude de validité de transfert. La validité de transfert du VOXEL-MAN Tempo® est plus difficile à mettre en évidence mais serait une étape supplémentaire dans la reconnaissance de l'intérêt de la simulation en réalité virtuelle pour la formation des otologistes.

CONCLUSION

Notre étude montre que l'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle semble améliorer la performance et les compétences techniques pour la réalisation d'une mastoïdectomie sur os temporal cadavérique chez les internes d'ORL novices. De plus, nos résultats mettent en évidence une diminution du nombre de lésions des structures nobles au cours des séances d'entraînement répétées sur le simulateur virtuel. L'apprentissage de la chirurgie du rocher par simulation en réalité virtuelle peut donc être envisagé pour optimiser la formation des internes d'ORL.

La place de la simulation en réalité virtuelle dans la formation pratique des chirurgiens otologiques reste à définir. Un simulateur en réalité virtuelle représente un investissement financier important, mais permet de pallier au manque de disponibilité des rochers cadavériques. Il peut s'agir aussi bien d'un outil de formation initiale permettant à de jeunes internes d'acquérir des connaissances anatomiques et des compétences techniques pour une technique opératoire, que d'un outil d'entraînement pour des chirurgiens expérimentés grâce à la capacité du simulateur virtuel à simuler un rocher de patient à partir de son scanner. Les résultats de notre étude sont en faveur de l'intégration d'un module de simulation en réalité virtuelle dans la formation en chirurgie otologique des internes d'ORL, parallèlement à l'apprentissage de la chirurgie au bloc opératoire par un système de compagnonnage déjà existant.

Cependant, des études complémentaires contrôlées et randomisées sur de plus grands effectifs sont nécessaires pour évaluer la validité de transfert au bloc opératoire des compétences acquises en chirurgie otologique suite à une formation sur simulateur en réalité virtuelle.

BIBLIOGRAPHIE

1. Granry J-C, Moll M-C. Rapport de mission : État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé. Haute Autorité de Santé. 2012.
2. Ségura J. Ce qu'il faut retenir de la réalité virtuelle au XXe siècle. 7èmes journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle. 2012.
3. Gallagher AG, Ritter EM, Satava RM. Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surg Endosc.* oct 2003;17(10):1525-9.
4. Barsom EZ, Graafland M, Schijven MP. Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training. *Surg Endosc.* 2016;30(10):4174-83.
5. Brewin J, Ahmed K, Khan MS, Jaye P, Dasgupta P. Face, content, and construct validation of the Bristol TURP trainer. *J Surg Educ.* août 2014;71(4):500-5.
6. Royal K. « Face validity » is not a legitimate type of validity evidence! *Am J Surg.* nov 2016;212(5):1026-7.
7. van Dongen KW, Tournoij E, van der Zee DC, Schijven MP, Broeders I a. MJ. Construct validity of the LapSim: can the LapSim virtual reality simulator distinguish between novices and experts? *Surg Endosc.* août 2007;21(8):1413-7.
8. Martin JA, Regehr G, Reznick R, MacRae H, Murnaghan J, Hutchison C, et al. Objective structured assessment of technical skill (OSATS) for surgical residents. *Br J Surg.* févr 1997;84(2):273-8.
9. Reznick R, Regehr G, MacRae H, Martin J, McCulloch W. Testing technical skill via an innovative « bench station » examination. *Am J Surg.* mars 1997;173(3):226-30.
10. McDougall EM. Validation of surgical simulators. *J Endourol.* mars 2007;21(3):244-7.
11. Van Nortwick SS, Lendvay TS, Jensen AR, Wright AS, Horvath KD, Kim S. Methodologies for establishing validity in surgical simulation studies. *Surgery.* mai 2010;147(5):622-30.
12. George AP, De R. Review of temporal bone dissection teaching: how it was, is and will be. *J Laryngol Otol.* févr 2010;124(2):119-25.
13. Bhutta MF. A review of simulation platforms in surgery of the temporal bone. *Clin Otolaryngol Off J ENT-UK Off J Neth Soc Oto-Rhino-Laryngol Cervico-Facial Surg.* oct 2016;41(5):539-45.
14. Zirkle M, Taplin MA, Anthony R, Dubrowski A. Objective assessment of temporal bone drilling skills. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* nov 2007;116(11):793-8.
15. Sturm LP, Windsor JA, Cosman PH, Cregan P, Hewett PJ, Maddern GJ. A systematic review of skills transfer after surgical simulation training. *Ann Surg.* août 2008;248(2):166-79.
16. Chiniara G, Cole G, Brisbin K, Huffman D, Cragg B, Lamacchia M, et al. Simulation in healthcare: a taxonomy and a conceptual framework for instructional design and media selection. *Med Teach.* août 2013;35(8):e1380-1395.
17. Rosen KR. The history of medical simulation. *J Crit Care.* juin 2008;23(2):157-66.

18. Gelbart NR. *The King's Midwife : A History and Mystery of Madame du Coudray*. Berkeley and London, University of California Press; 1998.
19. Cooper JB, Taqueti VR. A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Postgrad Med J*. nov 2008;84(997):563-70.
20. Philip JH. Gas Man--an example of goal oriented computer-assisted teaching which results in learning. *Int J Clin Monit Comput*. 1986;3(3):165-73.
21. Gaba DM, DeAnda A. A comprehensive anesthesia simulation environment: re-creating the operating room for research and training. *Anesthesiology*. sept 1988;69(3):387-94.
22. Satava RM. Historical review of surgical simulation--a personal perspective. *World J Surg*. févr 2008;32(2):141-8.
23. Kohn LT, Corrigan JM, Donaldson MS. *To Err is Human : Building a Safer Health System*. Institute of Medicine (US) Committee on Quality of Health Care in America; 2000.
24. Reznick RK. Teaching and testing technical skills. *Am J Surg*. mars 1993;165(3):358-61.
25. Makary MA, Daniel M. Medical error-the third leading cause of death in the US. *BMJ*. 03 2016;353:i2139.
26. Promouvoir la simulation en santé et la gestion des risques. Haute Autorité de Santé. 2019.
27. Bridges M, Diamond DL. The financial impact of teaching surgical residents in the operating room. *Am J Surg*. janv 1999;177(1):28-32.
28. Chikwe J, de Souza AC, Pepper JR. No time to train the surgeons. *BMJ*. 21 févr 2004;328(7437):418-9.
29. Philibert I, Friedmann P, Williams WT, ACGME Work Group on Resident Duty Hours. Accreditation Council for Graduate Medical Education. New requirements for resident duty hours. *JAMA*. 4 sept 2002;288(9):1112-4.
30. Fitzgerald JEF, Caesar BC. The European Working Time Directive: a practical review for surgical trainees. *Int J Surg Lond Engl*. 2012;10(8):399-403.
31. Gallagher AG, Ritter EM, Champion H, Higgins G, Fried MP, Moses G, et al. Virtual reality simulation for the operating room: proficiency-based training as a paradigm shift in surgical skills training. *Ann Surg*. févr 2005;241(2):364-72.
32. Dawe SR, Pena GN, Windsor JA, Broeders J a. JL, Cregan PC, Hewett PJ, et al. Systematic review of skills transfer after surgical simulation-based training. *Br J Surg*. août 2014;101(9):1063-76.
33. Seymour NE. VR to OR: a review of the evidence that virtual reality simulation improves operating room performance. *World J Surg*. févr 2008;32(2):182-8.
34. Scott DJ, Cendan JC, Pugh CM, Minter RM, Dunnington GL, Kozar RA. The changing face of surgical education: simulation as the new paradigm. *J Surg Res*. 15 juin 2008;147(2):189-93.

35. Peters JH, Fried GM, Swanstrom LL, Soper NJ, Sillin LF, Schirmer B, et al. Development and validation of a comprehensive program of education and assessment of the basic fundamentals of laparoscopic surgery. *Surgery*. janv 2004;135(1):21-7.
36. Sroka G, Feldman LS, Vassiliou MC, Kaneva PA, Fayez R, Fried GM. Fundamentals of laparoscopic surgery simulator training to proficiency improves laparoscopic performance in the operating room—a randomized controlled trial. *Am J Surg*. janv 2010;199(1):115-20.
37. Zendejas B, Ruparel RK, Cook DA. Validity evidence for the Fundamentals of Laparoscopic Surgery (FLS) program as an assessment tool: a systematic review. *Surg Endosc*. févr 2016;30(2):512-20.
38. Scott DJ, Dunnington GL. The new ACS/APDS Skills Curriculum: moving the learning curve out of the operating room. *J Gastrointest Surg Off J Soc Surg Aliment Tract*. févr 2008;12(2):213-21.
39. Deutsch ES, Wiet GJ, Seidman M, Hussey HM, Malekzadeh S, Fried MP. Simulation Activity in Otolaryngology Residencies. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg*. août 2015;153(2):193-201.
40. Joint Committee on Surgical Training Strategy 2013-2018 [Internet]. JCST. Disponible sur: <https://www.jcst.org/>
41. Royal Australian College of Surgeons Strategic Plan 2014-2018 [Internet]. RACS. Disponible sur: <https://www.surgeons.org/>
42. Musbahi O, Aydin A, Al Omran Y, Skilbeck CJ, Ahmed K. Current Status of Simulation in Otolaryngology: A Systematic Review. *J Surg Educ*. avr 2017;74(2):203-15.
43. Arora A, Lau LYM, Awad Z, Darzi A, Singh A, Tolley N. Virtual reality simulation training in Otolaryngology. *Int J Surg Lond Engl*. 2014;12(2):87-94.
44. Awad Z, Ahmed S, Taghi AS, Ghufloor K, Wareing MJ, Patel N, et al. Feasibility of a synthetic temporal bone for training in mastoidectomy: face, content, and concurrent validity. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol*. déc 2014;35(10):1813-8.
45. Mowry SE, Hansen MR. Resident participation in cadaveric temporal bone dissection correlates with improved performance on a standardized skill assessment instrument. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol*. janv 2014;35(1):77-83.
46. Wiet GJ, Stredney D, Kerwin T, Hittle B, Kang DR. Simulation for training in resource-restricted countries: using a scalable temporal bone surgical simulator. *Int J Med Educ*. 8 sept 2016;7:293-4.
47. Aussedat C, Venail F, Nguyen Y, Lescanne E, Marx M, Bakhos D. Usefulness of temporal bone prototype for drilling training: A prospective study. *Clin Otolaryngol Off J ENT-UK Off J Neth Soc Oto-Rhino-Laryngol Cervico-Facial Surg*. déc 2017;42(6):1200-5.
48. Miller JM, Astles R, Baszler T, Chapin K, Carey R, Garcia L, et al. Guidelines for safe work practices in human and animal medical diagnostic laboratories. Recommendations of a CDC-convened, Biosafety Blue Ribbon Panel. *MMWR Suppl*. 6 janv 2012;61(1):1-102.

49. Garcia L de B, Andrade JSC de, Testa JRG. Anatomical study of the pigs temporal bone by microdissection. *Acta Cir Bras.* 2014;29 Suppl 3:77-80.
50. Gurr A, Stark T, Probst G, Dazert S. [The temporal bone of lamb and pig as an alternative in ENT-education]. *Laryngorhinootologie.* janv 2010;89(1):17-24.
51. Lockwood CA, Lynch JM, Kimbel WH. Quantifying temporal bone morphology of great apes and humans: an approach using geometric morphometrics. *J Anat.* déc 2002;201(6):447-64.
52. Begall K, Vorwerk U. Artificial petrous bone produced by stereolithography for microsurgical dissecting exercises. *ORL J Oto-Rhino-Laryngol Its Relat Spec.* oct 1998;60(5):241-5.
53. Bakhos D, Velut S, Robier A, Al zahrani M, Lescanne E. Three-dimensional modeling of the temporal bone for surgical training. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol.* févr 2010;31(2):328-34.
54. Chenebaux M, Lescanne E, Robier A, Kim S, Bakhos D. Evaluation of a temporal bone prototype by experts in otology. *J Laryngol Otol.* juill 2014;128(7):586-90.
55. Hochman JB, Kraut J, Kazmerik K, Unger BJ. Generation of a 3D printed temporal bone model with internal fidelity and validation of the mechanical construct. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg.* mars 2014;150(3):448-54.
56. Rose AS, Kimbell JS, Webster CE, Harrysson OLA, Formeister EJ, Buchman CA. Multi-material 3D Models for Temporal Bone Surgical Simulation. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* juill 2015;124(7):528-36.
57. Cohen J, Reyes SA. Creation of a 3D printed temporal bone model from clinical CT data. *Am J Otolaryngol.* oct 2015;36(5):619-24.
58. Mowry SE, Jammal H, Myer C, Solares CA, Weinberger P. A Novel Temporal Bone Simulation Model Using 3D Printing Techniques. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol.* sept 2015;36(9):1562-5.
59. Longfield EA, Brickman TM, Jeyakumar A. 3D Printed Pediatric Temporal Bone: A Novel Training Model. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol.* juin 2015;36(5):793-5.
60. Takahashi K, Morita Y, Ohshima S, Izumi S, Kubota Y, Yamamoto Y, et al. Creating an Optimal 3D Printed Model for Temporal Bone Dissection Training. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* juill 2017;126(7):530-6.
61. Rose AS, Webster CE, Harrysson OLA, Formeister EJ, Rawal RB, Iseli CE. Pre-operative simulation of pediatric mastoid surgery with 3D-printed temporal bone models. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* mai 2015;79(5):740-4.
62. Koppersmith RB, Johnston R, Moreau D, Loftin RB, Jenkins H. Building a virtual reality temporal bone dissection simulator. *Stud Health Technol Inform.* 1997;39:180-6.
63. Zhao YC, Kennedy G, Hall R, O'Leary S. Differentiating levels of surgical experience on a virtual reality temporal bone simulator. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg.* nov 2010;143(5 Suppl 3):S30-35.

64. Zhao YC, Kennedy G, Yukawa K, Pyman B, O'Leary S. Can virtual reality simulator be used as a training aid to improve cadaver temporal bone dissection? Results of a randomized blinded control trial. *The Laryngoscope*. avr 2011;121(4):831-7.
65. Andersen SAW, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. Mastoidectomy performance assessment of virtual simulation training using final-product analysis. *The Laryngoscope*. févr 2015;125(2):431-5.
66. Fang T-Y, Wang P-C, Liu C-H, Su M-C, Yeh S-C. Evaluation of a haptics-based virtual reality temporal bone simulator for anatomy and surgery training. *Comput Methods Programs Biomed*. févr 2014;113(2):674-81.
67. Bennett W, Wilmot V, Reddy V, Alderson D. The realism and usefulness of the Voxel-Man TempoSurg and the Visible Ear simulator. *Bull R Coll Surg Engl*. 1 févr 2015;97(2):66-9.
68. Andersen SAW, Foghsgaard S, Konge L, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. The effect of self-directed virtual reality simulation on dissection training performance in mastoidectomy. *The Laryngoscope*. 2016;126(8):1883-8.
69. Sorensen MS, Mosegaard J, Trier P. The visible ear simulator: a public PC application for GPU-accelerated haptic 3D simulation of ear surgery based on the visible ear data. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol*. juin 2009;30(4):484-7.
70. Arora A, Khemani S, Tolley N, Singh A, Budge J, Varela DADV, et al. Face and content validation of a virtual reality temporal bone simulator. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg*. mars 2012;146(3):497-503.
71. Varoquier M, Hoffmann CP, Perrenot C, Tran N, Parietti-Winkler C. Construct, Face, and Content Validation on Voxel-Man® Simulator for Otologic Surgical Training. *Int J Otolaryngol*. 2017;2017:2707690.
72. Arora A, Hall A, Kotecha J, Burgess C, Khemani S, Darzi A, et al. Virtual reality simulation training in temporal bone surgery. *Clin Otolaryngol Off J ENT-UK Off J Neth Soc Oto-Rhino-Laryngol Cervico-Facial Surg*. avr 2015;40(2):153-9.
73. Reddy-Kolanu G, Alderson D. Evaluating the effectiveness of the Voxel-Man TempoSurg virtual reality simulator in facilitating learning mastoid surgery. *Ann R Coll Surg Engl*. avr 2011;93(3):205-8.
74. Khemani S, Arora A, Singh A, Tolley N, Darzi A. Objective skills assessment and construct validation of a virtual reality temporal bone simulator. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol*. sept 2012;33(7):1225-31.
75. Linke R, Leichtle A, Sheikh F, Schmidt C, Frenzel H, Graefe H, et al. Assessment of skills using a virtual reality temporal bone surgery simulator. *Acta Otorhinolaryngol Ital Organo Uff Della Soc Ital Otorinolaringol E Chir Cerv-facc*. août 2013;33(4):273-81.
76. Nash R, Sykes R, Majithia A, Arora A, Singh A, Khemani S. Objective assessment of learning curves for the Voxel-Man TempoSurg temporal bone surgery computer simulator. *J Laryngol Otol*. juill 2012;126(7):663-9.

77. Francis HW, Malik MU, Diaz Voss Varela DA, Barffour MA, Chien WW, Carey JP, et al. Technical skills improve after practice on virtual-reality temporal bone simulator. *The Laryngoscope*. juin 2012;122(6):1385-91.
78. Leuwer R, Petersik A, Pflesser B, Pommert A, Tolsdorff B, Höhne K-H, et al. VOXEL-MAN TempoSurg A Virtual Reality Temporal Bone Surgery Simulator. *J Jpn Soc Head Neck Surg*. janv 2007;17(3):203-7.
79. Butler NN, Wiet GJ. Reliability of the Welling scale (WS1) for rating temporal bone dissection performance. *The Laryngoscope*. oct 2007;117(10):1803-8.
80. Fernandez SA, Wiet GJ, Butler NN, Welling B, Jarjoura D. Reliability of surgical skills scores in otolaryngology residents: analysis using generalizability theory. *Eval Health Prof*. déc 2008;31(4):419-36.
81. Sethia R, Kerwin TF, Wiet GJ. Performance Assessment for Mastoidectomy. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg*. 2017;156(1):61-9.
82. Francis HW, Masood H, Chaudhry KN, Laeeq K, Carey JP, Della Santina CC, et al. Objective assessment of mastoidectomy skills in the operating room. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol*. juill 2010;31(5):759-65.
83. Arora A, Swords C, Khemani S, Awad Z, Darzi A, Singh A, et al. Virtual reality case-specific rehearsal in temporal bone surgery: a preliminary evaluation. *Int J Surg Lond Engl*. 2014;12(2):141-5.
84. Al-Shahrestani F, Sørensen MS, Andersen SAW. Performance metrics in mastoidectomy training: a systematic review. *Eur Arch Oto-Rhino-Laryngol Off J Eur Fed Oto-Rhino-Laryngol Soc EUFOS Affil Ger Soc Oto-Rhino-Laryngol - Head Neck Surg*. mars 2019;276(3):657-64.
85. Andersen SAW, Mikkelsen PT, Konge L, Cayé-Thomasen P, Sørensen MS. Cognitive load in distributed and massed practice in virtual reality mastoidectomy simulation. *The Laryngoscope*. févr 2016;126(2):E74-79.
86. Zhao YC, Kennedy G, Yukawa K, Pyman B, O'Leary S. Improving temporal bone dissection using self-directed virtual reality simulation: results of a randomized blinded control trial. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg*. mars 2011;144(3):357-64.
87. Olasky J, Sankaranarayanan G, Seymour NE, Magee JH, Enquobahrie A, Lin MC, et al. Identifying Opportunities for Virtual Reality Simulation in Surgical Education: A Review of the Proceedings from the Innovation, Design, and Emerging Alliances in Surgery (IDEAS) Conference: VR Surgery. *Surg Innov*. oct 2015;22(5):514-21.
88. Frithioff A, Sørensen MS, Andersen SAW. European status on temporal bone training: a questionnaire study. *Eur Arch Oto-Rhino-Laryngol Off J Eur Fed Oto-Rhino-Laryngol Soc EUFOS Affil Ger Soc Oto-Rhino-Laryngol - Head Neck Surg*. févr 2018;275(2):357-63.
89. Kurashima Y, Hirano S. Systematic review of the implementation of simulation training in surgical residency curriculum. *Surg Today*. juill 2017;47(7):777-82.

90. Frenndø M, Thinggaard E, Konge L, Sørensen MS, Andersen SAW. Decentralized virtual reality mastoidectomy simulation training: a prospective, mixed-methods study. *Eur Arch Oto-Rhino-Laryngol Off J Eur Fed Oto-Rhino-Laryngol Soc EUFOS Affil Ger Soc Oto-Rhino-Laryngol - Head Neck Surg.* 26 juill 2019;
91. Hochman JB, Rhodes C, Kraut J, Pisa J, Unger B. End User Comparison of Anatomically Matched 3-Dimensional Printed and Virtual Haptic Temporal Bone Simulation: A Pilot Study. *Otolaryngol-Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg.* août 2015;153(2):263-8.
92. Hardcastle T, Wood A. The utility of virtual reality surgical simulation in the undergraduate otorhinolaryngology curriculum. *J Laryngol Otol.* déc 2018;132(12):1072-6.

ANNEXES

Annexe 1 : Questionnaire pré-formation

Questionnaire pré-formation « Fraisage du rocher »

Formation / Expérience

Nom Prénom

Ville d'internat

Âge :

Femme / Homme

Semestres réalisés :

	ORL			Hors ORL
	Service généraliste	Service spécialisé en chirurgie otologique	Service sans chirurgie otologique (service spécialisé dans un autre domaine que l'otologie, explorations fonctionnelles...)	
1 ^{er} semestre				
2 ^{ème} semestre				
3 ^{ème} semestre				

Expériences de mastoïdectomie (répondre par un chiffre) :

- Sur simulateur virtuel :
- Sur prototype de rocher synthétique :
- Sur rocher cadavérique :
- Sur patient – En tant qu'observateur :
- Sur patient – Réalisation d'un temps opératoire :
- Sur patient – Réalisation de toute la mastoïdectomie :

Comment préparez-vous une intervention chirurgicale ?

- Livres / EMC : Toujours / Souvent / Rarement / Jamais
- Vidéos de démonstration chirurgicale : Toujours / Souvent / Rarement / Jamais
- Simulation virtuelle : Toujours / Souvent / Rarement / Jamais

- Dissection au laboratoire d'anatomie : Toujours / Souvent / Rarement / Jamais

Dans ce contexte, avez-vous facilement accès :

- A un simulateur virtuel ? Facilement / Occasionnellement / Difficilement
- A un laboratoire d'anatomie ? Facilement / Occasionnellement / Difficilement

La simulation :

Aviez-vous déjà entendu parler :

- de la simulation virtuelle pour le fraisage du rocher ? OUI / NON
- de la formation en simulation de manière générale ? OUI / NON

Pensez-vous que la simulation peut être utile :

- pour la formation en chirurgie ? OUI / NON
- pour la formation dans d'autres spécialités (urgences, réanimation, anesthésie, mises en situation...) ? OUI / NON

Aviez-vous déjà participé à une séance de simulation :

- Pour l'enseignement de la chirurgie : OUI / NON
Si oui laquelle/lesquelles :
Si oui quel est votre avis sur cette formation : Utile / Moyennement utile / Inutile
- Pour l'enseignement d'une autre discipline (urgences, réanimation, anesthésie, mises en situation...) ? OUI / NON
Si oui laquelle/lesquelles :
Si oui quel est votre avis sur cette formation : Utile / Moyennement utile / Inutile

Avis sur l'enseignement reçu en pré-formation (cours vidéo sur la réalisation d'une mastoïdectomie) :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Questionnaire d'anatomie (20 QCM)

1) Concernant le fraisage :

A- Utiliser une fraise du diamètre le plus petit possible

B- Fraiser avec la partie latérale de la fraise

C- Fraiser de la surface vers la profondeur

D- Evaser les bords de la cavité de fraisage

E- Préférer une fraise multipans à une fraise diamantée pour le fraisage proche des éléments nobles

2) Concernant la voie d'abord :

A- Il s'agit d'une incision cutanée rétro-auriculaire

B- On réalise un lambeau musculo-périosté à charnière postérieure

C- Il faut bien dégager la mastoïde en bas et en avant du MAE

D- Il faut bien dégager la mastoïde en haut et en avant du MAE

E- La voie d'abord permet de décoller la partie postérieure du conduit

3) Concernant l'épine de Henlé :

A- Elle est située en dessous et en arrière du MAE

B- Elle est située au-dessus et en arrière du MAE

C- Elle permet de repérer l'espace perforé de Chipault qui se trouve en arrière de l'épine

D- Elle permet de repérer les cellules rétro-labyrinthiques qui se trouvent en avant de l'épine

E- Elle permet de repérer l'antre qui se trouve en avant de l'épine

4) Le fraisage de la mastoïde débute :

A- Au-dessus du CAE

B- En arrière du sinus sigmoïde

C- Dans la région de la pointe mastoïdienne

D- Dans l'angle de Citelli

E- Dans la zone criblée rétro-méatique

5) Les limites de la mastoïdectomie sont :

A- La paroi postérieure du CAE en antérieur

B- Le tegmen tympani en supérieur

C- La linea temporalis en supérieur

D- Le sinus sigmoïde en postérieur

E- La pointe mastoïdienne en postérieur

6) A propos de l'antra mastoïdien :

A- C'est la plus grosse cellule mastoïdienne

B- Il est situé en profondeur de l'espace perforé de Chipault

C- Il est situé en arrière du sinus sigmoïde

D- Son fond est marqué par le relief du canal semi-circulaire postérieur

E- Il conduit à l'attique par l'aditus ad antrum

7) Concernant le tegmen antri :

A- C'est le prolongement en arrière du tegmen tympani

B- C'est la limite inférieure de la mastoïdectomie

C- C'est la limite supérieure de la mastoïdectomie

D- Le fraisage du tegmen interne permet de découvrir les cellules rétro-labyrinthiques

E- Le fraisage du tegmen interne permet de découvrir la 2^{ème} portion du nerf facial

8) Un bon fraisage de la méninge temporale est réalisé :

- A- De façon circulaire
- B- Parallèlement à la méninge
- C- Avec une fraise multipans de petit diamètre
- D- En surveillant la coloration rosée de l'os
- E- En évasant les berges en surface

9) Concernant le sinus sigmoïde :

- A- Sa corticale est lisse et bleutée
- B- Sa squelettisation s'effectue tangentiellement au sinus
- C- Le golfe de la jugulaire est identifié en suivant le sinus sigmoïde vers le haut
- D- Le golfe de la jugulaire est identifié en suivant le sinus sigmoïde vers le bas
- E- C'est la limite supérieure de la mastoïdectomie

10) Concernant l'angle de Citelli :

- A- C'est un angle formé entre la 3^{ème} portion du nerf facial et la méninge temporale
- B- C'est un angle formé entre le sinus sigmoïde et la méninge temporale
- C- C'est un angle formé entre le sinus sigmoïde et la 3^{ème} portion du nerf facial
- D- Il est situé dans la partie postérieure du triangle de fraisage
- E- Il est situé dans la partie antérieure du triangle de fraisage

11) Concernant le CSC latéral :

- A- Il se trouve dans le fond de l'antre mastoïdien
- B- Il est difficilement repérable dans une mastoïde bien pneumatisée
- C- Il apparait comme de l'os moins dense et jaunâtre
- D- Il se situe proche du bouton de l'étrier
- E- Il donne un repère en profondeur de la portion mastoïdienne du nerf facial

12) A propos des lésions du CSC latéral :

- A- On évite le risque de lésion en fraisant de la profondeur vers la superficie
- B- On évite le risque de lésion en fraisant de la superficie vers la profondeur
- C- Il y a un risque surtout en cas de procidence du sinus sigmoïde
- D- Il y a un risque surtout en cas de procidence de la méninge temporale
- E- L'ouverture du CSC peut entraîner une cophose

13) Concernant la crête digastrique :

- A- Elle se situe au niveau de la paroi externe de la pointe mastoïdienne
- B- Le muscle digastrique s'insère sur la crête
- C- C'est un repère pour la portion tympanique du nerf facial
- D- Il y a un risque de lésion du nerf si on fraise la partie antérieure de la crête
- E- Il y a un risque de lésion du nerf si on fraise la partie postérieure de la crête

14) Un bon fraisage de la 3^{ème} portion du nerf facial est réalisé :

- A- De façon circulaire
- B- Parallèlement au nerf
- C- Avec une fraise diamantée
- D- Sans irrigation
- E- Après amincissement du conduit

15) Les repères de la 3^{ème} portion du nerf facial sont :

- A- Le CSC latéral
- B- L'épine de Henlé
- C- La crête du muscle digastrique
- D- Le tendon de l'étrier
- E- Le bec de cuillère

16) A propos de l'attique :

A- Communique avec l'antre par l'aditus ad antrum

B- Correspond à l'étage inférieur de la caisse

C- Contient le corps de l'enclume

D- Contient la longue apophyse de l'enclume

E- Contient le manche du marteau

17) Concernant l'atticotomie :

A- On voit apparaître en premier la courte apophyse de l'enclume

B- On voit apparaître en premier la longue apophyse de l'enclume

C- L'atticotomie est plus facile si l'angle de Citelli a été bien dégagé

D- L'atticotomie est plus difficile en cas de procidence du tegmen

E- Il faut éviter de changer souvent d'orientation pour ne pas perdre de temps

18) A propos des parois de la caisse du tympan :

A- La paroi inférieure répond à l'artère carotide interne

B- La paroi inférieure répond à la veine jugulaire interne

C- La paroi médiale est occupée par les fenêtres vestibulaire et cochléaire

D- La paroi postérieure correspond à la paroi mastoïdienne

E- La paroi externe correspond au tympan

19) Les critères d'une bonne mastoïdectomie sont :

A- Une cavité étroite

B- Des bords évasés

C- Une méninge temporale repérée

D- Une ouverture large de l'antre

E- Un abaissement de la paroi postérieure du CAE

20) A la fin de l'antro-attico-mastoïdectomie, on doit visualiser :

A- Le corps de l'enclume

B- La tête du marteau

C- Le bouton de l'étrier

D- La troisième portion du nerf facial

E- Le canal semi-circulaire latéral

Annexe 2 : Echelle d'évaluation de la performance Welling Scale

Welling Scale			
		OUI	NON
Corticale			
1	Corticale arrondie à la linea temporalis	1	0
2	Corticale arrondie de la linea temporalis à la fosse cérébrale moyenne	1	0
3	Amincissement du mur postérieur	1	0
4	Saucérisation complète	1	0
Tegmen			
5	Dissection parallèle à la courbe durale	1	0
6	Exposition complète du tegmen	1	0
7	Pas de trou	1	0
8	Pas de cellule résiduelle	1	0
Sinus sigmoïde			
9	Pas de trou	1	0
10	Pas de cellule résiduelle	1	0
11	Pas de surplomb	1	0
Angle sinodural			
12	Net et aigu	1	0
13	Pas de cellule résiduelle	1	0
Rainure du digastrique			
14	Identification	1	0
15	Tendon du digastrique suivi jusqu'au foramen stylomastoïdien	1	0
Conduit auditif externe			
16	Hauteur du mur	1	0
17	Pas de trou	1	0
18	Pas de cellule résiduelle	1	0
Nerf facial			
19	Identification du nerf au foramen stylomastoïdien	1	0
20	Pas d'exposition de la gaine	1	0

Annexe 3 : Echelle d'évaluation de la technique Task-Based Checklist

Task-Based Checklist			
		OUI	NON
Corticale			
1	Choix d'une fraise appropriée	1	0
2	Bonne orientation osseuse	1	0
3	Fraisage avec des mouvements larges	1	0
4	Fraisage avec des mouvements long et doux	1	0
5	Bonne entame initiale de la mastoïdectomie	1	0
6	Bon fraisage continu	1	0
Dure mère			
7	Découverte à un moment appropriée de la dissection	1	0
8	Utilisation d'une technique de fraisage appropriée pour trouver la dure-mère	1	0
9	Sélection d'une fraise appropriée	1	0
10	Dissection parallèle au tegmen avant de le découvrir	1	0
11	Exposition progressive du tegmen à partir du point de découverte	1	0
12	Visualisation de la tête de la fraise durant l'exposition du tegmen	1	0
Sinus sigmoïde			
13	Utilisation d'une technique de fraisage appropriée	1	0
14	Utilisation d'une fraise appropriée	1	0
15	Dissection parallèle au sinus sigmoïde avant de le découvrir	1	0
16	Exposition progressive du sinus sigmoïde à partir du point de découverte	1	0
17	Visualisation de la tête de la fraise durant l'exposition du sinus sigmoïde	1	0
Canal semi-circulaire latéral			
18	Enclume trouvée après la reconnaissance du canal semi-circulaire latéral	1	0
Nerf facial			
19	Grossissement approprié pour identifier le nerf facial	1	0
20	Bonne orientation de la mastoïde pour optimiser la vision du nerf	1	0
21	Technique de fraisage utilisée appropriée	1	0

Annexe 4 : Questionnaire post-simulation virtuelle

Questionnaire de satisfaction après simulation virtuelle

Nom Prénom

Avez-vous trouvé les gestes suivants difficiles à réaliser ? (0=facile / 10=difficile)

- Repérage et fraisage de la méninge temporale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage et fraisage du sinus sigmoïde :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Amincissement du conduit auditif externe :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage du canal semi-circulaire latéral :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage des osselets :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage du nerf facial :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Avez-vous trouvé l'anatomie du rocher en simulation virtuelle comparable à l'anatomie sur un patient au bloc ? (0=différent / 10=ressemblant)

- Pour la méninge temporale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le sinus sigmoïde :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le conduit auditif externe :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le canal semi-circulaire latéral :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour les osselets :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le nerf facial :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- De manière globale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Concernant le matériel de simulation :

- L'image 3D était satisfaisante :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- La représentation graphique était réaliste :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- Le retour de force était satisfaisant :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- L'outil de fraisage virtuel était satisfaisant :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- L'outil d'aspiration virtuelle était satisfaisant :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- L'outil d'orientation était satisfaisant :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- L'installation était satisfaisante :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- Le logiciel était instinctif / facile d'utilisation :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- Je trouve utile le fait d'obtenir un score en fin de fraisage :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Avez-vous eu des bugs pendant votre séance sur le simulateur virtuel ? OUI / NON

Si oui combien :

Et quel(s) type(s) de bug(s) :

J'ai davantage confiance pour réaliser une mastoïdectomie au bloc après cette séance :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

J'ai appris une nouvelle compétence grâce à cette séance :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Si oui préciser laquelle :

Conseilleriez-vous cette formation à un(e) collègue :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Pensez-vous qu'il serait bénéfique que cette formation fasse partie du cursus pour tout interne d'orl :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Si vous aviez un accès facile à cet outil, l'utiliseriez-vous pour préparer une intervention ?

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Note globale de satisfaction :

- Cette formation m'a permis(e) d'améliorer ma technique chirurgicale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Cette formation m'a permis(e) d'améliorer mes connaissances en anatomie :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Annexe 5 : Questionnaire post-dissection

Questionnaire de satisfaction après dissection

Nom Prénom

Je me sentais suffisamment préparé(e) pour cette séance de dissection :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Avez-vous trouvé les gestes suivants difficiles à réaliser ? (0=facile / 10=difficile)

- Repérage et fraisage de la méninge temporale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage et fraisage du sinus sigmoïde :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Amincissement du conduit auditif externe :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage du canal semi-circulaire latéral :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage des osselets :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Repérage du nerf facial :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Avez-vous trouvé l'anatomie sur rocher cadavérique comparable à l'anatomie sur un patient au bloc?
(0=différent / 10=ressemblant)

- Pour la méninge temporale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le sinus sigmoïde :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le conduit auditif externe :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le canal semi-circulaire latéral :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour les osselets :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Pour le nerf facial :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- De manière globale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Concernant le matériel :

- Le microscope était satisfaisant :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- Le matériel de fraisage était satisfaisant :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

- L'installation était satisfaisante :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

J'ai davantage confiance pour réaliser une mastoïdectomie au bloc après cette séance :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

J'ai appris une nouvelle compétence grâce à cette séance :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Si oui préciser laquelle :

Conseilleriez-vous cette formation à un(e) collègue :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Pensez-vous qu'il serait bénéfique que cette formation fasse partie du cursus pour tout interne d'orl :

Oui Plutôt oui Indifférent Plutôt non Non

Note globale de satisfaction :

- Cette formation m'a permis(e) d'améliorer ma technique chirurgicale :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- Cette formation m'a permis(e) d'améliorer mes connaissances en anatomie :

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

RÉSUMÉ

Introduction : La dissection sur os temporal (OT) cadavérique est actuellement considérée comme la référence pour la formation des internes en chirurgie otologique. L'accès aux laboratoires d'anatomie et la disponibilité des OT cadavériques peuvent être difficiles. L'objectif de cette étude prospective était d'évaluer l'intérêt de la simulation en réalité virtuelle pour l'apprentissage de la mastoïdectomie chez des internes d'Oto-Rhino-Laryngologie (ORL) novices.

Matériel et Méthodes : Vingt internes d'ORL en troisième semestre, provenant de six villes d'internat différentes, étaient répartis en deux groupes. Les dix internes du groupe « sans simulation » ont réalisé directement une mastoïdectomie sur OT cadavérique, tandis que les dix internes du groupe « simulation » ont bénéficié de deux séances d'entraînement sur le simulateur en réalité virtuelle VOXEL-MAN Tempo® avant de réaliser la mastoïdectomie sur cadavre. La performance et la technique de dissection ont été évaluées sur OT cadavérique par deux évaluateurs à l'aide d'échelles d'évaluation validées, respectivement Welling Scale et Task-Based Checklist.

Résultats : Les deux groupes étaient comparables concernant l'expérience et les connaissances anatomiques en chirurgie otologique. L'évaluation de la performance lors de la dissection sur OT cadavérique mettait en évidence une supériorité significative pour le groupe « simulation » ($p = 0.02$) avec un score moyen de performance de 14.3 [10-17] sur 20, comparativement à 11.4 [7-15] pour le groupe « sans simulation ». L'évaluation de la technique montrait également une supériorité significative pour le groupe « simulation » ($p = 0.002$) avec un score moyen de technique de 16.7 [14-19] sur 21, comparativement à 13.1 [9-16] pour le groupe « sans simulation ».

Conclusion : L'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle semblait améliorer la performance et les compétences techniques pour la réalisation d'une mastoïdectomie sur cadavre chez des internes d'ORL novices. L'apprentissage de la chirurgie par simulation en réalité virtuelle peut donc être envisagé pour optimiser la formation des internes, et pour pallier au manque de disponibilité des OT cadavériques.

Mots clés : Simulation, Réalité virtuelle, Mastoïdectomie, Formation chirurgicale