



Impact de la simulation haptique dans l'enseignement en odontologie

David Joseph

► To cite this version:

David Joseph. Impact de la simulation haptique dans l'enseignement en odontologie. Médecine humaine et pathologie. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0233 . tel-01816937

HAL Id: tel-01816937

<https://theses.hal.science/tel-01816937>

Submitted on 15 Jun 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Ecole Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **David JOSEPH**

**« Impact de la simulation haptique dans l'enseignement en
odontologie »**

Le 5 décembre 2017

Membres du jury :

Rapporteurs :

Pr Philippe GIBERT

Professeur des Universités Praticien Hospitalier
Faculté d'Odontologie de Montpellier, **Montpellier**
Professeur des Universités Praticien Hospitalier
Faculté d'Odontologie de Paris Descartes, **Paris**

Pr Marie Laure COLOMBIER

Examineurs :

Pr Marjolaine GOSSET

Professeur des Universités Praticien Hospitalier
Faculté d'Odontologie de Paris Descartes, **Paris**
Professeur des Universités
Ecole des Mines, **Nancy**
Maîtres de conférences
Faculté de Médecine de Nancy, **Nancy**
(Directeur de Thèse)

Pr Marie Reine BOUDAREL

Dr Nguyen TRAN

Pr Pascal AMBROSINI

Professeur des Universités Praticien Hospitalier
Faculté d'Odontologie de Nancy, **Nancy**
(Co-directeur)

Invité :

Pr Jean Marc MARTRETTE

Professeur des Universités Praticien Hospitalier
Faculté d'Odontologie de Nancy, **Nancy**

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de « l'Ecole de Chirurgie Nancy-Lorraine » dirigée par le Dr Nguyen TRAN et le Pr Laurent BRESLER, rattachée à l'unité Inserm U-1116 dirigée par le Dr Patrick LACOLLEY que je remercie pour son chaleureux accueil.

Je souhaite remercier mon directeur de thèse, Monsieur Nguyen TRAN, pour m'avoir accueilli et guidé sur le chemin, éclairé de ses conseils et encouragé à chaque étape de la réalisation de ce travail. « There is no way to happiness - happiness is the way »

Merci à mon co-directeur, Monsieur Pascal AMBROSINI pour son soutien indéfectible, sa gentillesse et son aide tout au long de l'élaboration de ce travail.

Une part de ces travaux n'auraient pas pu voir le jour sans une collaboration intense avec l'Equipe de l'ERPI (Équipe de Recherche sur les Processus Innovatifs) et particulièrement Madame Laure MOREL, Monsieur Mauricio CAMARGUO et Monsieur Giovanni ARBELAEZ-GARCES que je souhaite remercier pour leurs disponibilités et leurs contributions à la réalisation des expérimentations. Merci également aux étudiants de l'ENSGSI (École nationale supérieure en génie des systèmes et de l'innovation) qui ont participé à la mise en place des protocoles.

Un grand merci également à Monsieur Marin VINCENT et mes collègues du département d'odontologie conservatrice pour l'efficacité de leur collaboration.

Un travail sur la pédagogie nécessite bien entendu des apprenants, c'est pourquoi je tiens à remercier tous les étudiants de la faculté d'odontologie qui se sont prêtés aux différentes expériences menées et qui je l'espère ont pu apprécier la simulation en odontologie.

Merci à « ma famille de l'Ecole de Chirurgie », votre accueil, la bienveillance, la bonne humeur permanente et le soutien que vous m'avez témoigné tout au long de ces années me sont précieux.

Merci à mes collègues et amis de la faculté d'odontologie de Nancy pour leur aide sans faille.

Enfin, merci à tous ceux, famille ou amis, qui, de près ou de loin, dans l'ombre ou la lumière, ont rendu ce moment possible.

Impact de la simulation haptique dans la formation en odontologie

I.	Nouveaux paradigmes pédagogiques et contribution de la simulation.....	4
I.1.	Le modèle transmissif.....	5
I.2.	Le behaviorisme.....	5
I.3.	Le constructivisme.....	6
I.4.	Le socio constructivisme.....	7
I.5.	Serious game, Serious Play et Simulateurs.....	10
I.6.	La simulation dans le processus d'acquisition du savoir : certifications des compétences et sécurisation des actes	16
I.6.1.	En aéronautique.....	17
I.6.2.	Dans la marine.....	18
I.6.3.	Dans l'industrie nucléaire.....	18
I.6.4.	En médecine	19
I.6.5.	Dispositifs haptiques et fidélité en simulation	19
I.6.5.1.	La simulation organique	22
I.6.5.2.	La simulation non organique.....	22
I.6.5.3.	Notion de fidélité	23
I.6.5.4.	Les enjeux de la simulation médicale	26
I.6.6.	La simulation en odontologie.....	28
I.6.7.	Les différents types de simulation.....	30
I.6.7.1.	Les pièces anatomiques.....	31
I.6.7.2.	Les unités de formation dentaire.....	32
I.6.7.3.	Les unités de formation augmentées.....	33
I.6.7.4.	Les nouveaux simulateurs haptiques.....	36
I.7.	Objectifs de la thèse	43
II.	Travaux réalisés	44
II.1.	Impact de la simulation haptique dans l'enseignement de l'implantologie	44
II.1.1.	Résumé de l'article : « Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology » (Article publié dans le Biomed International research IF=2.88)	44

II.1.2.	Article : « Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology » (Article publié dans le Biomed International research IF=2.88)	46
II.2.	Impact de la simulation haptique dans l'enseignement de la dentisterie restauratrice	56
II.2.1.	Résumé de l'article : « Haptic simulation improve technical skills in restorative dentistry ».....	56
II.2.2.	Article : « Haptic simulation improve technical skills in restorative dentistry » soumis dans le BMC Medical education, (Co 1 ^{er} auteur) IF = 1.572	57
II.3.	Impact de la vision 3D dans la simulation haptique en implantologie	90
II.3.1.	Résumé de l'article : « 3D vision and students' performance with haptic simulation in implantology »	90
II.3.2.	Article : « 3D vision and students' performance with haptic simulation in implantology » soumis prochainement en (Co 1 ^{er} auteur).....	92
II.4.	Contribution des accéléromètres dans l'évaluation objective des compétences chirurgicales en odontologie.....	105
II.4.1.	Résumé de l'article : « Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students: an accelerometer based approach »	105
II.4.2.	Article : « Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students: an accelerometer based approach » soumis dans le « International Journal of Industrial Ergonomics », (Co 1 ^{er} auteur) IF = 1.415.....	105
III.	Discussion	125
III.1.	La contribution des simulateurs dans la formation en Odontologie	125
III.1.1.	En Implantologie	125
III.1.2.	En dentisterie restauratrice	130
III.2.	Nouveaux paramètres objectifs d'amélioration de la courbe d'apprentissage.....	133
III.2.1.	La contribution du 3-D	133
III.2.2.	Les capteurs de mouvement	134
IV.	Conclusion	136
V.	Bibliographie.....	139

Liste des Figures

Figure 1: Niveau de risque selon l'activité (d'après Bilotta et coll. 5)	9
Figure 2: Différenciation d'un serious game, serious play et simulateurs d'après Lelardeux et coll. ⁹	13
Figure 3: Modèle de classification G/P/F/P selon Alvarez et al. ¹²	14
Figure 4: Définitions des sens du toucher	20
Figure 5: Dispositifs haptiques utilisés de façon courante. a) Phantom Omni ®, b) Phantom Desktop ®, c) Phantom Premium ®, et d) Novint Falcon ®	21
Figure 6: Les différents types de simulations (D'après G. Chiniara).....	23
Figure 7: Les différentes fidélités d'un simulateur	25
Figure 8: Un simulateur non standardisable (les dents extraites)	31
Figure 9: Le pied de cochon: un simulateur simple pour l'entraînement aux techniques de sutures	32
Figure 10: Exemple d'unité de formation dentaire (DESplus de chez Kavo).....	33
Figure 11: Simulateur de mâchoire (Kavo® système)	33
Figure 12: Exemple de dents en résine utilisées en formation,	33
Figure 13: dispositif de repérage couplé à un contre angle classique.....	34
Figure 14: Unité de formation avec Dentsim® (camera de repérage en haut à droite)..	34
Figure 15: Le travail effectué avec évaluation sur le Dentsim®	35
Figure 16: EPED system	35
Figure 17: Vue générale du Voxel Man®	36
Figure 18: Aspect général du simulateur Virteasy® (1 ^{ère} génération)	37
Figure 19: Le dispositif haptique Geomagic Touch X (anciennement phantom desktop® de chez sensible) utilisé pour le Virteasy®	37
Figure 20: Nouvelle version du simulateur Virteasy®	38
Figure 21: Simulateur hapTEL.....	38
Figure 22: Le Simodont® en assemblage	40
Figure 23: Utilisation du Simodont®	40
Figure 24: Utilisation du simulateur Kobra®	40
Figure 25: Vue d'ensemble du simulateur Kobra®	41
Figure 26: Aspect du Periosim®	41
Figure 27: Aspect global du patient robot	42
Figure 28: Simulateur patient robot.....	42
Figure 29: Module d'évaluation (les critères sont plus détaillés, les marges de tolérance sont désormais indiquées).....	129

I. Nouveaux paradigmes pédagogiques et contribution de la simulation

L'efficiencia de la transmisión de los conocimientos académicos y el uso de los conocimientos adquiridos en problemas prácticos implica una reflexión, una exigencia de resultados y una evolución constante de los paradigmas pedagógicos ¹.

Enseñar puede revestir diferentes significaciones, transmitir, inculcar o hacer construir. En efecto :

Enseñar, en el rapporto al conocimiento, es transmitir conocimientos en los exponiendo lo más claramente y lo más precisamente posible.

Enseñar, en el fin de desarrollar la adquisición de automatismos, revient a inculcar comportamientos, gestos, reacciones.

Enseñar, en el marco de una relación privilegiada de « Maître-Elève », revient a hacer aprender, hacer estudiar, guiar, mostrar el camino en las puestas en actividad que l'on propone.

En función de l'objectif a alcanzar, los medios empleados serán diferentes.

Face al l'enseñante « ingénieur/artisan », se encuentra un aprendiz que va de lo conocido hacia lo desconocido y que durante su camino va adquirir y apropiarse conocimientos, construir nuevos esquemas de pensamiento y de acción para desarrollar nuevas competencias.

Si el término de ingeniería pedagógica es de más en más usado, es que refleja la evolución del rol del enseñante, convertido con el tiempo a la vez ingeniero y artesano ². Ingeniero porque al igual de este, él concibe con anticipación secuencias de trabajo, anticipa necesidades y organiza el recorrido de progresión de sus alumnos ; artesano porque él debe hacer con los medios a su disposición en adaptándose a cada situación.

Avant de parler de simulation dans l'enseignement et l'apprentissage de l'odontologie et de l'implantologie, il paraît nécessaire de rappeler quelques concepts de théorie de l'apprentissage, en partant du modèle traditionnel, pour évoquer trois courants de philosophie pédagogique que sont le behaviorisme, le constructivisme et le socioconstructivisme afin de mieux cerner la place que peut prendre le nouvel outil d'enseignement qu'est la simulation dans l'apprentissage.

I.1. Le modèle transmissif

Pratiqué de façon courante, ce modèle classique d'enseignement repose sur le principe d'un enseignant central (celui qui sait) face à des élèves (qui eux ne savent pas). Il s'agit plus d'un modèle d'enseignement que « d'enseignement-apprentissage » dans la mesure où le pilier principal est le cours magistral proprement dit.

Dans ce modèle, l'enseignant est en charge de rendre le savoir accessible et vérifie l'efficacité de la transmission en organisant le parcours d'acquisitions progressif des connaissances.

Ce modèle vertical dans lequel l'apprenant est plutôt passif, nécessite pour être efficace des apprenants motivés et attentifs.

Cependant on pourra objecter que cette modalité d'enseignement ne permet pas de s'adapter au rythme de chaque apprenant dans la mesure où c'est l'enseignant qui impose le rythme auquel il distille les informations. Dans cette situation et avec l'avènement des ressources numériques qui favorise la disponibilité quasi-immédiate des éléments informatifs adéquats, le temps dédié à la transmission classique de la théorie est de plus en plus remis en question. Actuellement, une réflexion sur la réorganisation du schéma « cours magistral – interactivité – pratique » est engagée pour proposer une meilleure dynamique de l'apprentissage et une prise en compte accrue des aspirations individuelles.

I.2. Le behaviorisme

Il s'agit de l'un des premiers courants de pensée sur la théorie de l'apprentissage. Créé par l'Américain Watson en 1913 à partir du mot anglais « behavior », signifiant comportement, il correspond à la manifestation observable de la maîtrise d'un comportement. Couramment associé aux travaux de Pavlov, le behaviorisme a donné naissance au conditionnement

opérant, l'enseignement programmé, la pédagogie par objectifs et l'enseignement assisté par ordinateur.

Le behaviorisme propose comme moyens le conditionnement, apprendre par essais-erreurs et le renforcement positif et négatif.

Pour le behaviorisme l'apprenant doit être « capable de + un verbe d'action » (nommer, reconnaître, classer...) et non un verbe mentaliste (comprendre, savoir, réfléchir) ; le but étant d'obtenir des comportements observables.

Dans le behaviorisme, apprendre c'est donc être capable de donner la réponse adéquate grâce à la mise en œuvre d'une procédure reposant sur la répétition de l'association « stimulus-réponse », et ce, en faisant abstraction de façon intentionnelle des différences initiales des capacités d'acquisition interindividuelles.

Ce modèle, que l'on pourrait comparer au « contrôle qualité » dans une chaîne de production, est particulièrement adapté à l'apprentissage technique pour obtenir des automatismes ou la connaissance d'un algorithme d'action. Il peut cependant montrer ses limites dans un cadre d'apprentissage personnalisé.

En effet, en voulant simplifier une tâche complexe par la réalisation d'une succession d'apprentissage plus simple, ce modèle obère l'objectif pédagogique complexe recherché. L'apprenant, bien qu'il puisse réaliser avec succès les étapes intermédiaires d'apprentissage, peut ne pas maîtriser correctement les finalités de la tâche. Comme dans beaucoup de domaines, « le tout est plus que la somme de ses parties ».

I.3. Le constructivisme

Jean Piaget, en 1923, a été le premier à théoriser cette stratégie pédagogique. Cette théorie met en avant l'individu, ses acquis et ses aspirations pour construire une représentation de la réalité qui l'entoure afin de (i) dessiner un parcours pédagogique adapté et (ii) l'acquisition de connaissance sur une base personnalisée plus active. L'apprenant structure ou restructure ses pensées au fur et à mesure qu'il apprend, en s'adaptant. Il devient un acteur actif qui recherche du sens, de la signification dans toutes choses car c'est en construisant que l'on retient et apprend. L'adaptation nécessaire de l'apprenant fait appel à l'assimilation qui permet à l'individu d'intégrer de nouvelles données dans un cadre mental existant et

l'accommodation qui va pousser l'individu à modifier sa façon de voir les choses, et de se conduire.

Ces 2 processus d'intégration et d'accommodation caractérisent l'intelligence entendue comme adaptation, meilleur compromis ou équilibre entre l'individu et son environnement.

Le constructivisme place l'apprenant au centre du système enseignement-apprentissage, en le considérant comme l'artisan de ses connaissances. Dans ce modèle, il faut prendre en compte les connaissances antérieures et tenir compte des schémas de pensée de l'apprenant, qui peuvent servir de point d'appui ou à l'inverse d'obstacle, à l'acquisition de nouvelles connaissances.

La mise en place de situation-problème, en favorisant un conflit cognitif doit permettre à l'étudiant de progresser selon le schéma « assimilation- conflit cognitif- accommodation- équilibration majorante ».

Cette approche de la pédagogie nécessite, pour pouvoir être mise en œuvre, une évolution des mentalités. L'enseignant n'est plus aussi central que dans le modèle transmissif classique et semble plus adapté à l'apprentissage de situations complexes nécessitant autre chose qu'un automatisme.

Cette approche implique un accès aux informations pour l'apprenant afin qu'il puisse construire sa stratégie face aux problèmes qui lui sont soumis. L'accès à l'information, limité à l'époque de Piaget, est de plus en plus facilité grâce aux technologies modernes, ce qui a permis l'essor de ce concept.

I.4. Le socio constructivisme

Appelée également sociocognitive, cette théorie en plein développement ajoute la dimension des interactions en considérant l'apprentissage comme la résultante d'échanges enseignant-élève et apprenant-apprenant. Dans cette théorie, c'est la mise en interactivité entre les différents acteurs qui conduit à la construction du savoir.

Pour Vygotski, l'être humain, fondamentalement social de nature, développe ses fonctions psychiques supérieures pour des raisons culturelles. L'éducation restructure de manière fondamentale toutes les fonctions du développement ³.

L'apprentissage permet à l'apprenant de s'approprier tout un héritage culturel. L'apprentissage favorise la formation de zone de prochain développement (ZPD) qui représente l'écart entre ce que l'apprenant est capable de réaliser seul et ce qu'il peut réaliser avec l'aide d'un pair, d'un tuteur. Il apparaît ici que l'apprenant saura faire par lui-même ce qu'il ne pouvait faire avant qu'avec l'aide d'un tiers.

Dans cette approche, le rôle de l'enseignant change en devenant alors le guide, le tuteur et/ou le facilitateur qui éclaire le cheminement vers la connaissance du novice.

Le socioconstructivisme s'appuie également sur le processus d'étayage décrit par Bruner ⁴ qui considère que la culture donne forme à l'esprit et que l'activité mentale ne se produit jamais isolément. Apprendre est « un processus interactif dans lequel les gens apprennent les uns des autres ».

L'enseignant aura pour rôle d'intéresser l'apprenant à la tâche, en le maintenant motivé, en rendant la tâche agréable sans que l'apprenant ne soit trop dépendant de lui. L'élève ne doit pas perdre de vue le but à atteindre.

Les encouragements, la sympathie, la bienveillance sont des points importants pour maintenir la motivation.

L'enseignant doit également apporter un soutien cognitif en simplifiant parfois une tâche de façon à la mettre à la portée de l'apprenant, il doit également pouvoir proposer des chemins de résolution sans pour autant donner la solution.

Grace à ce processus d'étayage, l'élève peut réaliser des choses qu'il ne parvenait pas à faire seul et la compréhension des exigences de la tâche à réaliser et des modalités de résolution engendre des effets d'apprentissage à plus long terme.

Dans le concept du socioconstructivisme, apparaît également le conflit sociocognitif avec une dimension interactive. Ce conflit qui peut entraîner des débats, des divergences de points de vue aboutit à la réalisation d'un travail explicatif.

Enfin, favoriser les pratiques de métacognition (réflexion sur son activité afin d'en prendre conscience) est également un point important dans ce concept. C'est le fait d'apprendre à apprendre.

Une meilleure connaissance de la manière dont l'individu s'y prend pour apprendre permet d'élaborer des connaissances sur la manière d'acquérir de nouvelles connaissances.

Ces différents modèles, rapidement évoqués pour introduire notre propos, montrent un changement permanent de paradigme en pédagogie depuis plus d'un siècle. En partant du modèle traditionnel pour aller vers le socio constructivisme, l'enseignant n'est plus dans un rôle de soliste mais dans celui d'accompagnateur qui aide ses élèves à trouver, organiser et gérer le savoir.

Dans les métiers à risques comme l'aviation, la marine marchande, la sûreté nucléaire ou encore la médecine, la simulation fait partie de l'arsenal pédagogique à disposition de l'enseignant (ingénieur-artisan) pour remplir sa mission. Ces métiers peuvent d'ailleurs être classés en fonction du taux d'erreur par opération, allant de « idéal » à « dangereuse » en passant par « très sûr » et « régulé » ⁵.

Malgré un développement technologique et sociétal important durant ces dernières décennies, les opérations médicales restent les activités les plus dangereuses.

Très sûr	<1/100000 morts par an	Contrôleur aérien, industrie nucléaire, transport ferroviaire
Régulé		Conduite automobile, industrie chimique, vol charter
Dangereux	>1/100 morts par an	Saut à l'élastique, escalade en haute montagne, course de moto, hospitalisation

Figure 1: Niveau de risque selon l'activité (d'après Bilotta et coll. 5)

En odontologie comme en médecine, les avancées technologiques ont permis l'éclosion de nouvelles techniques thérapeutiques en perpétuelle évolution dont la finalité est de rechercher sans cesse à repousser les limites thérapeutiques. Cependant, le développement de ces nouvelles techniques nécessite également une formation-reformation du professionnel de santé afin d'offrir au patient un maximum de sécurité dans sa prise en charge.

Force est de constater que la multiplicité et l'évolution des techniques obligent à repenser la formation qui présente de grandes disparités. La validation des compétences, souvent basée

sur des critères subjectifs, ne permet pas toujours de juger des véritables compétences des futurs praticiens.

Dans la recherche de nouvelles stratégies de pédagogie, la simulation peut prendre un rôle majeur dans la formation. Notre travail a eu pour objet de s'intéresser à un nouveau dispositif pédagogique alliant dispositif haptique (voir I.6) et informatique. Avant de détailler ce dispositif, il nous paraît intéressant de refaire le point sur la simulation et « les simulateurs », les « Serious Game » et « Serious Play » afin de mieux cerner la place de ce dispositif dans le monde des nouvelles stratégies pédagogiques.

I.5. Serious game, Serious Play et Simulateurs

La simulation, qui peut revêtir différentes caractéristiques, basse ou haute-fidélité, qualifiée pour certaines formes de réalité augmentée ou de réalité virtuelle, haptique ou non, est en passe de révolutionner la formation comme cela a pu être le cas dans d'autres domaines. De plus, la question centrale de toutes les formations concerne et concernera l'impérieuse nécessité de l'évaluation et la certification des compétences. Il faudra pouvoir répondre aux questions suivantes : quel est le but de l'évaluation ? Quoi évaluer ? Quand évaluer ? Comment évaluer ? ⁶

La simulation et les simulateurs font partie de ces nouveaux outils pédagogiques dans lesquels on peut distinguer les Serious Game et les Serious Play. Nous allons voir que la frontière entre ces différents outils est parfois ténue, avec des fonctions utilitaires identiques mais des modalités différentes. Nous verrons au final que c'est davantage l'usage, les postures de l'utilisateur et le contexte qui permettront de les distinguer.

Les Serious Game, utilisés dans de nombreux domaines comme la défense, l'éducation, la politique, et bien sûr la santé, peuvent revêtir différents noms comme « Virtual reality », « Simulation », « Edutainment », « Synthetic Learning Environment », selon la cible visée.

Un Serious Game combine à la fois une dimension utilitaire avec un aspect vidéoludique pour lequel le concepteur recherche à susciter le « flow » qui correspond à « *un état dans lequel sont plongées les personnes qui sont absorbées par une activité qui seule semble importer et qui ignorent totalement leur environnement tout en appréciant la tâche à accomplir et tout en éprouvant du plaisir en la faisant.* ». En fait le Serious Game doit permettre de réaliser une tâche de façon plaisante.

Le but des Serious Game n'est pas seulement de divertir : selon M. Zyda, il constitue « un défi cérébral contre un ordinateur impliquant le respect de règles spécifiques et qui s'appuie sur le divertissement pour atteindre des objectifs liés à la formation institutionnelle ou professionnelle, l'éducation, la santé, la politique intérieure ou la communication »⁷.

Cependant cette définition du Serious Game, s'articulant autour de l'industrie du jeu vidéo, ne fait pas l'unanimité, car certains comme Clark Abt dans les années 1970, considèrent que le Serious Game qui vise à réduire la frontière entre apprentissage scolaire et apprentissage informel peut tout à fait être un jeu de société, un jeu de rôle et bien sûr un jeu sur ordinateur⁸.

Plus récemment Lelardeux et coll.⁹ ont ainsi défini les Serious Game comme « *une application informatique dont l'intention initiale est de combiner, avec cohérence, à la fois des aspects utilitaires (Serious) tels, de manière non exhaustive et non exclusive, l'enseignement, l'apprentissage, la communication, ou encore l'information, avec des ressorts ludiques issus du jeu vidéo (Game). Une telle association qui s'opère par l'implémentation d'un scénario utilitaire, qui sur le plan informatique correspond à implémenter un habillage (sonore et graphique), une histoire et des règles idoines, a donc pour but de s'écarter du simple divertissement* »⁹.

Le Serious Game peut avoir plusieurs fonctions. La fonction principale est de délivrer un message, qu'il soit informatif, éducatif, marketing ou subjectif dans le but de (i) de diffuser une opinion et/ou (ii) de permettre un entraînement et une acquisition de compétences physiques et/ou cognitives. C'est ce type de Serious Game que nous utilisons.

Un dernier type de Serious Game, basé sur l'échange des données (Datagame) peut également compléter cette classification. Un exemple en rapport avec la médecine est celui de l'énigme de la structure d'une enzyme lié au VIH qui a pu être résolu en quelques semaines grâce à ce type de Serious game (FOLDIT). Un Serious Game peut être axé sur une ou plusieurs de ces fonctions.

Pour comprendre la différence entre Serious Game et Serious Play il nous faut introduire les notions de « paidia » et « ludus » initialement définies par Caillois en 1958¹⁰ et actualisées en 2012 par Frasca¹¹ qui correspondent à 2 formes ludiques distinctes.

La « paidia », jouet, ne définit pas d'objectif explicite permettant de gagner alors qu'un jeu « ludus » définit des objectifs clairs et mesurables.

La « paidia » se rapprochant de l'idée d'amusement « play » alors que le « game » sous-tend la notion de règles.

C'est ainsi que nous pouvons distinguer les Serious play et Serious Game. A l'instar des Serious Game, les Serious play peuvent diffuser un message, dispenser un entraînement ou permettre la collection de données.

Les simulateurs quant à eux sont définis par « l'utilisation d'un matériel (mannequin ou simulateur procédural), d'un logiciel informatique (simulateur numérique), d'un dispositif de réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels»⁹.

En se basant sur les travaux de Lelardeux et coll., il est possible de distinguer Serious Game, Serious play et simulateur selon différentes modalités.

	Serious Game	Serious play	Simulateur
Caractéristiques			
Permet de diffuser un message	X	X	X
Permet de dispenser un entraînement	X	X	X
Permet la collecte de données	X	X	X
Objectifs			
Propose des objectifs à atteindre	X		

Permet à un instructeur de fixer des objectifs		X	X
Juge si les objectifs proposés sont atteints	X		
Usages			
Invite à adopter une posture ludique	X	X	
Son utilisation nécessite la présence d'un instructeur/formateur ou un haut niveau d'expertise			X
Peut s'utiliser en autonomie	X	X	
Représentation			
Peut reproduire avec fidélité le réel	X	X	X
Peut convoquer un modèle imaginaire	X	X	
Peut convoquer une métaphore	X	X	
Public cible			
Public averti	X	X	X
Grand public	X	X	

Figure 2: Différenciation d'un serious game, serious play et simulateurs d'après Lelardeux et coll.⁹

En se basant sur ce tableau de synthèse, la notion de simulateur et de Serious Game peut être difficile à cerner lorsque l'on cherche à classer les dispositifs haptiques utilisés en santé dont nous avons cherché à valider l'intérêt en formation.

On pourrait alors s'aider de la classification proposé par Alvarez en 2008¹² dérivée de celle de Sawyer et Smith baptisée « Gameplay/Purpose /Fonction /Public ».

-Le Gameplay : permet de distinguer si la partie vidéoludique contient des objectifs explicites et permet de distinguer si nous sommes plus en présence d'un « Serious Game » ou d'un « Serious Play ».

-Purpose : s'attache à définir la nature de la fonction utilitaire à savoir diffuser un message, dispenser un entraînement, ou un échange de données

-Fonction : en santé il s'agit de prévention, publicité, éducation, soins...

-Publics : particuliers, praticiens, chercheurs et institutions

Le dispositif haptique qui nous a intéressés pour notre travail peut donc être classé selon ces différents critères :

-Gameplay : Serious game

-Purpose : Dispenser un entraînement

-Fonction : Education, soins

-Publics : Etudiants, praticiens.

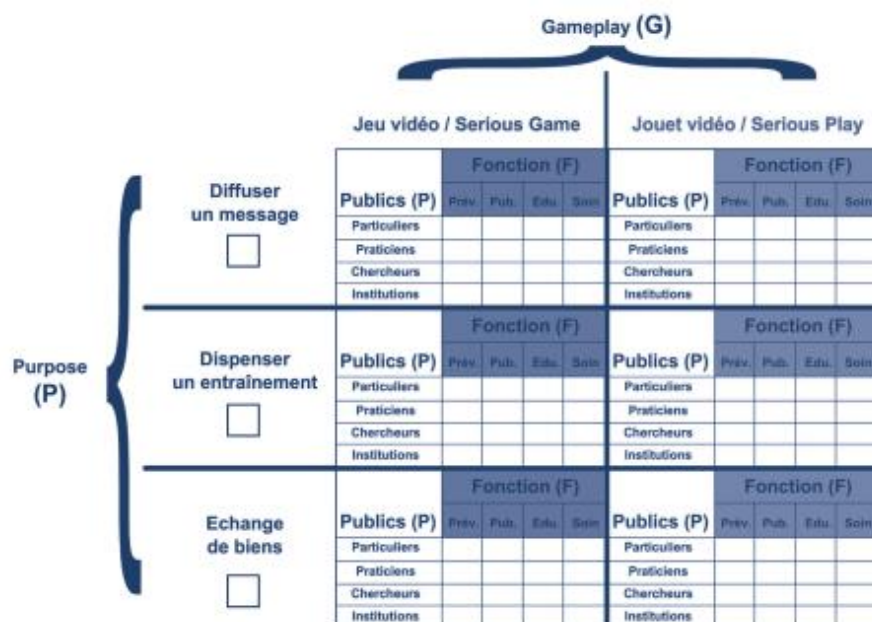


Figure 3: Modèle de classification G/P/F/P selon Alvarez et al. ¹²

I.6. La simulation dans le processus d'acquisition du savoir : certifications des compétences et sécurisation des actes

La simulation : « Représentation modélisée, figurée d'un phénomène »

Pour le Dictionnaire « Larousse », simuler correspond à : Représentation du comportement d'un processus physique, industriel, biologique, économique ou militaire au moyen d'un modèle matériel dont les paramètres et les variables sont les images de ceux du processus étudié. (Les modèles de simulation prennent le plus souvent la forme de programmes d'ordinateurs auxquels sont parfois associés des éléments de calcul analogique.)

Dans cette définition l'ordinateur et le calcul informatique prennent déjà une place importante.

Le mot simulation est également défini de la façon suivante : méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène, un système à étudier par un modèle plus simple, mais ayant un comportement analogue (« Petit Larousse ® »).

Un point important dans cette définition est le fait que la simulation n'a pas nécessairement besoin d'être une copie conforme mais que le phénomène étudié peut être simplifié.

Pour le dictionnaire « Robert », le mot provient du latin Simulare ayant pour sens :

Représenter exactement, copier, imiter, feindre, prendre l'apparence de.

Donner pour réel ce qui ne l'est pas en imitant l'apparence de la chose à laquelle on veut faire croire.

Certains auteurs comme Pascal Beguin et Annie Weill Fassina ¹³ définissent la simulation comme une méthode d'enseignement, de savoir-faire et d'habiletés utilisé dans des tâches pour lesquelles un enseignement direct s'avère impossible pour des raisons déontologiques (sécurité et sûreté), économiques ou techniques. Le but est de permettre à l'opérateur d'apprendre à reproduire de la façon la plus réaliste et fidèle les comportements attendus.

Parmi les nombreuses activités humaines dites « à risque », certaines ont adopté très tôt la simulation comme outil d'enseignement-apprentissage, c'est le cas de l'aéronautique et de la marine.

I.6.1. En aéronautique

L'aéronautique est considérée comme le berceau de la simulation professionnelle à grande échelle. En se basant sur un programme rigoureux appelé SBT (Simulation base training), l'industrie de l'aviation a résisté à des décennies de défis de sécurité.

Cette approche par simulation a ensuite été adaptée à d'autres domaines à risques tels que l'industrie nucléaire, militaire et également médicale (comme l'anesthésie réanimation, les urgences...) ^{14,15}.

Grâce à cette approche, l'aviation est passée dans les années 1950 de statut d'activité « à risques » à activité « sûre ».

Même si on ne peut apprendre à voler sans voler, la simulation intervient très tôt dans la formation en aéronautique particulièrement pour les formations de reconversions spécifiques à chaque appareil ¹⁶.

Hormis les pilotes, le personnel de cabine est également formé par simulation pour ce qui concerne les manœuvres d'évacuation (toboggans, issues de secours...).

Les aiguilleurs du ciel bénéficient également de la simulation dans leur formation.

L'aéronautique est le domaine où il y a le plus de simulateurs de tous ordres, le plus de règlements les imposant dans la formation continue et le plus grand taux de satisfaction. Notons également que ces formations sont culturellement parfaitement acceptées par les pilotes et le personnel d'équipage.

Le coût de la formation continue représente un poids moyen de 10 à 15 % du budget total d'une compagnie ou d'un système de contrôle.

Toujours à l'avant-garde, l'industrie aéronautique est également pionnière dans l'utilisation de la simulation grâce au big data pour concevoir des avions plus sûrs et performants ¹⁷.

I.6.2. Dans la marine

Mise en place dès les années 80 pour l'entraînement au travail sur radar, la simulation s'est développée jusqu'à un niveau de fidélité dans lequel le réalisme permet de travailler au-delà des tâches techniques : les comportements ¹⁸.

La modification des traités et des normes internationales oblige également à repenser les formations pour s'adapter à la législation en vigueur.

La simulation en formation initiale permet de valider une compétence en situation.

Le coût important (humain et matériel) pour acquérir les simulateurs et les faire fonctionner entraîne la mise en place de partenariats public-privé. Les simulateurs utilisés dans la formation maritime permettent une certification-recertification grâce à des règles établies et acceptées au niveau international définissant des standards de qualité de haut niveau, des critères de compétences et d'évaluation.

Comme en aéronautique, des simulateurs dits « fullmission » permettent de travailler les comportements.

Malgré les bienfaits de la simulation, celle-ci ne peut remplacer l'expérience pour certaines situations, elle ne transforme pas un novice en expert mais aide le novice à faire ses premiers pas dans des conditions de sécurité améliorées ¹⁶.

I.6.3. Dans l'industrie nucléaire

A l'instar de l'aéronautique et de la marine, l'industrie nucléaire qu'elle soit civile ou militaire a très rapidement adopté la simulation. L'exploitant doit à la fois maintenir son savoir-faire mais également l'actualiser pour faire face à l'évolution de la réglementation. Ainsi chaque site nucléaire Français est doté d'un simulateur de pilotage et d'un simulateur de maintenance.

Les salles de commandes sont reproduites à l'échelle 1 et des calculateurs permettent en temps réel de simuler les paramètres physiques de l'installation. Ce type de simulateur permet de former toute une équipe en charge du fonctionnement des réacteurs d'une centrale. Ce simulateur pleine échelle filmé par des caméras permet d'envisager des séances de débriefing dont la durée doit être adaptée et suffisante pour permettre une discussion.

En formation initiale, le développement ou l'apprentissage de nouvelles méthodes sont possibles par le simulateur. Grâce au simulateur, le nombre d'arrêts automatiques des réacteurs du parc nucléaire français a été réduit de 20% depuis 2006 ¹⁶.

I.6.4.En médecine

La simulation est une méthode pédagogique incontournable dans le domaine médical, qu'il s'agisse de la formation initiale ou continue. Elle peut être utilisée de manière complémentaire dans les curriculums.

La réforme des études de 2009 encourage le passage d'une formation fondée sur la transmission de « savoirs académiques » aux savoirs « fondés sur l'appropriation des savoirs »¹.

Dans son rapport sur la simulation, la Haute autorité de santé utilise la définition suivante pour introduire la simulation. Le terme simulation en santé correspond à « l'utilisation d'un matériel (comme un mannequin ou un simulateur procédural), de la réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soins, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décisions par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels » (Chambre des représentants USA, 111th congress 02-2009)

De façon simple, on peut distinguer la simulation dite organique faisant appel à l'homme ou à des animaux et la simulation non organique. Dans cette catégorie, on différencie la simulation électronique quand l'ordinateur tient une place importante et la simulation synthétique quand celui-ci ne joue pas un rôle majeur. Avant de nous intéresser aux différents types de simulations en médecine, nous allons nous intéresser à la notion de dispositifs haptiques et de fidélité en simulation.

I.6.5.Dispositifs haptiques et fidélité en simulation

- ***Haptique***

Le sens du toucher (haptique) est le sens qui se développe en premier lors de l'embryogénèse, c'est un sens capital pour avoir une bonne pratique clinique ¹⁹.

L'haptique, du grec ἅπτομαι (haptomai) qui signifie « je touche », désigne la science du toucher, par analogie avec l'acoustique ou l'optique. Au sens strict, l'haptique englobe le toucher et les phénomènes kinesthésiques, c'est-à-dire la perception du corps dans l'environnement.

Définitions des principaux termes utilisés pour décrire haptique et le sens du toucher²⁰

Haptique	Relatif au sens du toucher
Proprioceptif	Relatif à l'information sensorielle sur l'état du corps
Vestibulaire	Se rapportant à la perception de la position de la tête, l'accélération et la décélération.
Kinesthésique	Signification de la sensation de mouvement. Relatif à des sensations originaires des muscles, des tendons et des articulations
Cutané	Relatif à la peau elle-même comme un organe sensoriel. Comprend la sensation de pression, la température et la douleur
Tactile	Relatif au sens cutané mais plus spécifiquement la sensation de pression plutôt que de la température ou de la douleur
Retour de force	Relatif à la production mécanique de l'information détectée par le système kinesthésique humain

Figure 4: Définitions des sens du toucher

En simulation, il va s'agir de tous les dispositifs permettant de retranscrire la sensation, de fournir un retour de force.

Il s'agit de faire ressentir une réalité virtuelle (VR) ou un véritable objet situé à distance de façon indirecte.

Les dispositifs haptiques permettent de fournir un retour de force. Lorsque ces dispositifs sont utilisés avec des écrans ou toutes sources d'informations visuelles, ils peuvent alors être utilisés pour l'entraînement à des tâches qui requièrent une coordination œil/main ²¹.

Ces dispositifs électromécaniques avec manipulateurs sont caractérisés par leur degré de liberté (DOF= degree of freedom). La résolution de ces dispositifs *i.e.* la quantité de rétroaction par unité de distance, doit être élevée afin de fournir un plus grand détail des textures dans les environnements virtuels. La zone de mouvement doit être suffisamment grande pour simuler l'espace de travail réel ²².

Différents dispositifs sont disponibles sur le marché

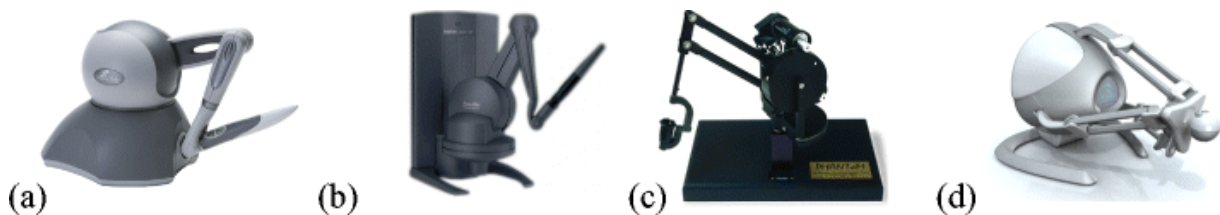


Figure 5: Dispositifs haptiques utilisés de façon courante. a) Phantom Omni ®, b) Phantom Desktop ®, c) Phantom Premium ®, et d) Novint Falcon ®

- **Réalité Virtuelle**

Le but de la Réalité Virtuelle est de faire percevoir à un utilisateur un monde artificiel (créé numériquement) ressemblant à un monde réel et de donner à cet utilisateur la possibilité d'interagir intuitivement et naturellement avec ce monde. L'intérêt est de pouvoir mettre l'Homme dans un environnement que nous contrôlons, qui serait impossible à reproduire dans le monde réel ou qui serait trop onéreux ou trop risqué.

La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à un groupe de personnes), une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel créé numériquement, qui peut être « imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel » ²³.

La réalité virtuelle doit permettre d'offrir une expérience riche et plus moins proche de la réalité.

En fonction de la fidélité (voir chapitre 1.6.3) et de l'interactivité, le degré de réalisme sera plus ou moins important.

I.6.5.1. La simulation organique

Sur patient ou animaux décédés, il s'agit de simulation procédurale.

Sur patient vivant cela correspond au concept de patients standardisés ou de consultations simulées (ce type de simulation est fréquemment utilisé en médecine pour former les étudiants au savoir être, et peut servir pour certaines épreuves de type station ECOS (Evaluation Clinique Objective Structurée))

I.6.5.2. La simulation non organique

- Elle peut être synthétique procédurale

Dans cette catégorie, on retrouve tout ce qui va toucher à la simulation procédurale, ce type de simulateur permet de reproduire certaines techniques précises. Généralement, il s'adresse aux novices. Exemples : tête et tronc pour apprendre l'intubation, bras de perfusion pour l'apprentissage de la pose de cathéters...

D'autres simulateurs plus complexes associent l'informatique à une reproduction haute-fidélité des différents signaux (visuels, auditifs et tactiles). Exemples : simulateurs de chirurgie.

- Elle peut être synthétique de patients

En médecine ce sont des mannequins grandeur nature pilotés par ordinateur et reproduisant de façon réaliste un patient complet avec ses structures anatomiques et ses réponses physiologiques à différents stimuli.

- Elle peut être également électronique à interface non naturelle

Ce sont des logiciels de simulation consultés sur des écrans. Ils sont adaptés à l'apprentissage de type e-learning. Les applications sont interactives et permettent un apprentissage et une évaluation des connaissances. Certains parlent de « Serious Game » pour ce type de simulation puisqu'elle se rapproche de l'environnement des jeux vidéo. Dans ce cas on peut parler de simulateur numérique.

Enfin la simulation peut être électronique à interface naturelle. On parle souvent de « simulateurs à réalité virtuelle ».

Ils reproduisent des équipements réels mais les données générées et le feed back procuré au participant sont générés par les ordinateurs. Exemples : les respirateurs

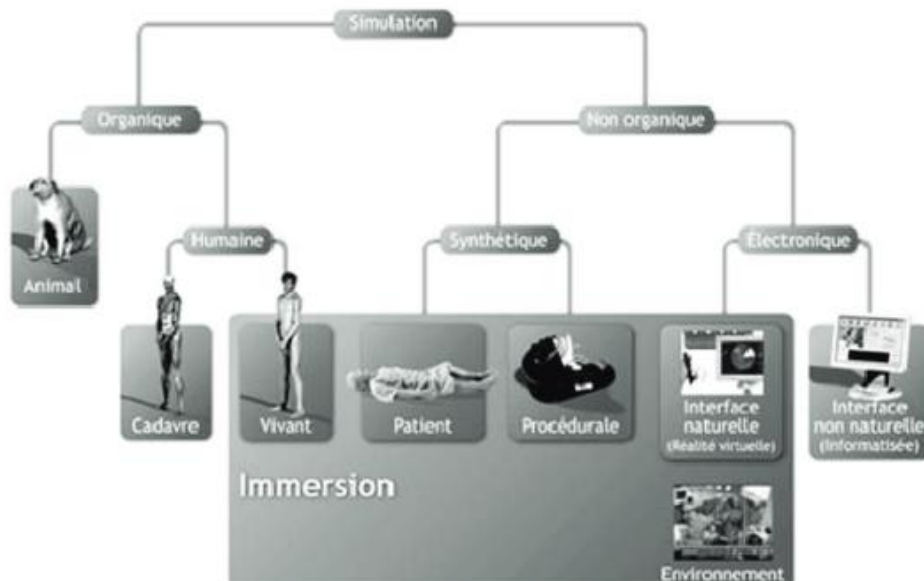


Figure 6: Les différents types de simulations (D'après G. Chiniara)

On peut également dans cette situation parler de simulateurs mixtes car ils combinent à la fois une partie logicielle et une partie dite « physique » composée d'objets embarquant de l'informatique et/ou de l'électronique communiquant avec le(s) logiciels(s) via une interface numérique⁹.

I.6.5.3. Notion de fidélité

On a classiquement l'habitude de classer les simulateurs en basse et haute fidélité.

Même si certains parmi la communauté des enseignants utilisent le terme de simulateur et de simulateur haute fidélité de façon identique, il est possible de distinguer plusieurs type de simulateurs²⁴.

Les simulateurs procéduraux sont qualifiés de basse fidélité alors que les manequins complexes sont qualifiés de haute fidélité.

Cependant il faut noter que certains simulateurs procéduraux peuvent reproduire les réactions et sensations de façon bien plus réaliste que certains mannequins complexes, et la fidélité ne doit pas être envisagé sous œil simpliste de façon unidimensionnelle.

Une nouvelle conception de la fidélité à 3 ou 4 dimensions issues de la simulation aéronautique peut également être utilisée :

On y trouvera :

- **La fidélité psychologique** : degré avec lequel le participant accepte la simulation comme alternative à la réalité.
- **La fidélité de l'équipement** : le simulateur reproduit-il l'aspect de l'équipement réel ?
Le simulateur duplique-t-il l'apparence et la sensation du système réel.
- **La fidélité de l'environnement** : le simulateur et son environnement reproduisent ils les signaux visuels et sensoriels réels.

A ces 3 fidélités décrites par Rehmann et coll en 1995 ²⁵ on peut ajouter également :

- **La fidélité temporelle** : le temps en simulation est-il le même que dans la réalité ?

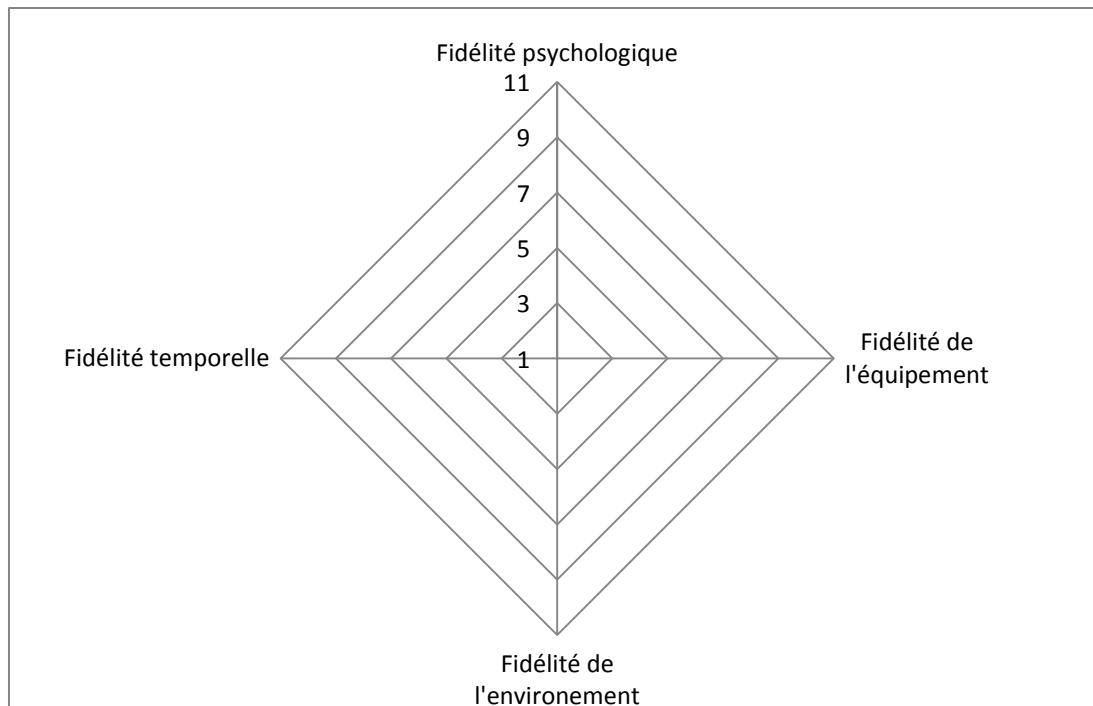


Figure 7: Les différentes fidélités d'un simulateur

Pour synthétiser, les simulateurs peuvent avoir 4 fonctions principales dans le domaine médical :

- permettre la compréhension de concepts (Connaissance)
- guider le praticien et permettre l'anticipation
- travailler un geste technique (Compétences)
- apprendre à coopérer (Attitudes)

Dans le cas du travail en équipe par exemple, c'est la fidélité psychologique du simulateur qu'il faudra prendre soins de développer. Certains auteurs soulignent également que la technologie qui aide à simuler l'environnement et les caractéristiques de l'équipement peuvent permettre d'accroître la fidélité psychologique si le programme d'entraînement est bien conçu mais la technologie ne compensera pas un scénario mal conçu.

L'intérêt de la simulation va être de pouvoir se focaliser sur une des compétences. En contrôlant l'environnement d'apprentissage, le formateur va pouvoir se focaliser sur un objectif précis de la formation proposée. En fonction du but recherché le formateur pourra privilégier un type de fidélité par rapport à un autre, le plus souvent, la formation nécessitera différents niveaux de fidélité pendant différents exercices à différents moment tout au long du programme de formation. Développer un programme de formation est une tâche extrêmement complexe qui ne pourra être réalisée qu'après une analyse complète des besoins.

Lors d'une formation, les premières étapes d'apprentissage permettent l'acquisition de la zone de contenu (ce qui implique l'exécution d'une tâche). Avec la répétition la réalisation de la tâche demande une attention moins consciente pour arriver au stade ultime de compétence cognitive. L'apprentissage passe par les 4 stades *i.e* incompétence inconsciente, incompétence-consciente, compétences-consciente, compétence-inconsciente.

La perfection ne peut être obtenue que par la pratique avec retour d'information ²⁴, c'est tout l'enjeu du briefing/débriefing qui permet d'identifier les leçons apprises pendant la séance.

Cette notion de briefing/débriefing, permet également de distinguer deux notions, « **la pratique simulée** » qui comprend uniquement la période pendant laquelle l'apprenant réalise son entraînement pratique et la « **séance de simulation** » qui est l'entité pédagogique incluant le briefing, la pratique simulée et la conclusion de la séance ⁶.

Au final, la simulation peut être décrite comme une représentation sélective de la réalité contenant seulement certains éléments de la réalité que le concepteur considère comme pertinents surtout dans le cadre d'un enseignement ²⁶.

I.6.5.4. Les enjeux de la simulation médicale

La maxime « Jamais la première fois sur le patient » tend à s'imposer dans le domaine médical comme le fondement des nouveaux paradigmes pédagogiques en médecine. En effet l'ère du « see one, do one » ²⁷ a tendance à disparaître au profit de nouvelles méthodes d'apprentissage.

La nécessité de maîtriser et d'optimiser les coûts de formation des futurs professionnels de santé ainsi qu'un nombre croissant de jeunes confrères soucieux de se voir offrir une offre de formation initiale et continue de haut niveau leur permettant d'acquérir des compétences dans tous les domaines innovants qu'ils soient techniques ou technologiques, nous obligent à repenser les méthodes de transmission du savoir.

La refondation du socle d'acquisition des connaissances grâce à des processus de pédagogie innovante doit aboutir in fine à la possibilité de certifier/re-certifier les futurs professionnels de santé par des méthodes objectives.

L'amélioration de la prise en charge des patients passe par un délicat équilibre de formation qui doit permettre l'acquisition de connaissances, de compétences mais également de comportements adéquats.

En médecine, la transmission du savoir selon un modèle traditionnel dit halstedien, un maître-un élève, a montré ses limites.

Les enjeux sont multiples : en effet, la simulation doit permettre de réduire le risque pour le patient afin de respecter le premier principe (« primum non nocere ») et de satisfaire aux recommandations qui veulent qu'un acte ne soit jamais réalisé la première fois sur un patient (« never the first time on the patient »), recommandations reprises par la Haute autorité de santé dans son rapport sur la simulation ¹⁶.

On retrouve aussi des enjeux pédagogiques : le nombre croissant d'étudiants souhaitant se former aux nouvelles disciplines, la stagnation ou la baisse du nombre d'enseignants qui se voient affecter un nombre croissant de tâches, oblige à repenser les stratégies pédagogiques. Grâce à la simulation, les étudiants peuvent se former à la réalisation de plus d'actes en autonomie.

La simulation peut également jouer un rôle dans la certification des compétences et dans la formation des praticiens voulant acquérir de nouvelles habilités.

Enfin, le dernier enjeu de la simulation est d'ordre financier. C'est un des freins au développement de la simulation car il faut de nombreux moyens, humains et financiers pour créer une structure dédiée à la simulation.

Dans le domaine aéronautique, la mise en place de formation sur simulateur pleine échelle permet de réduire de façon importante les coûts de formations. En effet le coût de simulation est nettement inférieur au cout d'une heure de vol en situation réelle.

De même dans l'industrie nucléaire, la mise en place de la simulation dans la formation du personnel a permis par exemple de diminuer le nombre d'arrêts automatiques des centrales.

Dans le domaine médical, une étude américaine a pu démontrer qu'une formation sur simulateur permettait une diminution significative du nombre d'infections sur cathéters centraux. Les économies réalisées par cette baisse d'infections (moins d'antibiotiques utilisés, durée d'hospitalisation réduite...) étaient susceptibles de rembourser au moins 7 fois le coût de formation ²⁸.

Concernant la validité des travaux scientifiques sur la simulation chirurgicale, une étude réalisée par une équipe australienne ²⁹ conclut que :

Les résultats globaux ne permettent pas d'affirmer la supériorité d'une méthode de simulation (informatique, vidéo, matériel ou cadavre) par rapport à une formation classique ou l'absence de formation préalable, ceci est dû à une méthodologie insuffisante, à de petits échantillons ou à des techniques non standardisés.

Les auteurs insistent sur la nécessité de réaliser des études multicentriques avec des protocoles communs et d'évaluer le coût de la simulation.

Les simulateurs deviennent jour à près jour une alternative ou du moins un complément de plus en plus indispensable à la formation pratique en Santé. Les progrès informatiques permettent de développer des outils de plus en plus réalistes mesurant objectivement la performance des utilisateurs.

Quelle que soit la stratégie pédagogique envisagée, la courbe d'apprentissage dans le domaine médical va se focaliser principalement sur deux aspects : l'optimisation du temps opératoire et la réduction de la morbidité pour le patient ²².

Ces deux aspects ont été pris en compte dans notre travail expérimental.

I.6.6. La simulation en odontologie

Bien évidemment en odontologie et en implantologie, le risque vital est moins souvent engagé que dans le domaine de l'anesthésie ou d'autres types de chirurgies. Cependant la nature irréversible de la majorité des actes opératoires pratiqués en odontologie oblige le futur praticien à acquérir une expertise de haut niveau tant sur le plan théorique que pratique lui permettant de prodiguer des soins de qualité en limitant le risque de morbidité ³⁰.

Il est intéressant de rappeler ici que parallèlement à une augmentation toujours croissante du nombre d'implants posés par an, le nombre de déclarations auprès des assurances pour des sinistres concernant l'implantologie a largement explosé ces dernières années ³¹.

En odontologie, l'acquisition précoce des compétences cliniques n'est pas réalisée sur un patient mais sur des modèles appelés fantomes ⁶. En effet, la simulation est au cœur de la

formation des futurs chirurgiens-dentistes depuis de nombreuses années. La simulation peut revêtir différents aspects, il peut s'agir de systèmes physiques, virtuels ou mixtes.

En formation continue se développent les « Serious Games » permettant la répartition et l'acquisition d'automatismes.

L'enseignement de l'odontologie diffère dans son approche de celui de la médecine. En effet, l'étudiant en chirurgie dentaire est amené rapidement à prodiguer des soins et à réaliser des actes techniques sur des patients (généralement à partir de la 4ème année) et doit être opérationnel pour son exercice à la fin du cursus qui a une durée de 6 années.

Selon les pays, la formation théorique peut soit être réalisée complètement avant la pratique clinique soit être répartie tout au long du cursus avec une montée en charge de plus en plus importante de la clinique au fur et à mesure que l'étudiant avance dans ses années d'études.

En France, 3 années de préclinique mêlant cours théoriques et travaux pratiques précèdent 3 années de clinique qui incluent également un volet théorique.

Au terme de cette formation de 6 années ou 8 à 9 (si l'étudiant choisit la voie de l'internat en odontologie), celui-ci se retrouve en autonomie et pourra compléter ses connaissances par la formation continue.

Le travail d'équipe en implantologie :

En faisant intervenir le praticien, l'assistant, le prothésiste et même le patient, le travail en implantologie peut être défini comme un travail d'équipe tel que Salas et coll. ³² l'ont décrit.

Pour ces auteurs une équipe est définie de la façon suivante :

- elle se compose d'un groupe de deux personnes ou plus,
- chacun des membres a une tâche ou un rôle en particulier à remplir et interagit et/ou assure la coordination avec les autres membres pour atteindre un objectif ou un résultat commun,
- elle prend des décisions,
- elle incarne des connaissances et des compétences spécialisées, et assume souvent une charge de travail élevée,
- elle présente des interdépendances en ce qui a trait au déroulement du travail, à l'action collective et aux objectifs,

-elle fait partie d'un vaste système organisationnel.

Lors de la formation en implantologie cette notion de travail d'équipe devra être prise en compte dans le curriculum.

En odontologie, différents systèmes de simulation peuvent être utilisés

- ***Les systèmes physiques***

Ce sont principalement les *typodonts*, fabriqués en plâtre, en résine ou dans d'autres types de matériaux, ils permettent de reproduire l'anatomie des maxillaires, des dents et de la gencive. Les nouveaux modèles plus évolués reproduisent également l'anatomie des structures adjacentes comme le sinus maxillaire.

Le développement de la robotique a permis récemment de mettre au point un simulateur haute-fidélité (voir Robot patient).

- ***Les systèmes virtuels***

Développés de façon autonome ou dans le cadre de collaborations. Il s'agit en majorité de systèmes orientés vers l'odontologie conservatrice et parfois vers l'odontologie chirurgicale.

On retrouve dans cette catégorie, le Simodont (www.simodont.org), le Virtual reality dental training system VRDTS ³³, le Individual dental education assistant ³⁴, hapTEL ³⁵, Virteasy® ³⁶, Voxelman® ³⁷, Kobra®, Periosim® ³⁸.

- ***Les systèmes mixtes***

Il s'agit des systèmes utilisant les fantômes traditionnels et les systèmes informatiques.
(Voir chapitre sur les unités de formation augmentées)

I.6.7. Les différents types de simulation

I.6.7.1. Les pièces anatomiques

- Les dents naturelles extraites

Il s'agit d'un premier type de simulateur, certes basique mais efficace, permettant aux étudiants de développer leur compétence gestuelle pour les problématiques de préparations cavitaires et des couronnes.

Les problèmes principaux sont l'approvisionnement et surtout de la reproductibilité. En effet chaque dent étant unique, il peut être difficile d'évaluer de façon objective les qualités de plusieurs étudiants. Ces dents sont généralement insérées dans des modèles en plâtre afin de les utiliser sur des fantômes.

Dans une volonté de certification des compétences, il faut que tous les étudiants puissent réaliser le même exercice et donc disposer d'un modèle standard. Ce type de simulateur ne peut donc prétendre répondre à cette exigence.



Figure 8: Un simulateur non standardisable (les dents extraites)

- Les autres pièces anatomiques :

Elles peuvent être prélevées sur des cadavres humains ou animaux.

Il s'agit principalement de mâchoires humaines ou animales, partielles ou complètes, permettant aux étudiants d'observer l'anatomie et de réaliser des incisions et sutures de chirurgie buccale.

Les difficultés d'approvisionnement, de stockage et conservation ne permettent pas de les utiliser de façon répétitive avec beaucoup d'étudiants.

Les pieds de cochons sont souvent utilisés pour entrainer les étudiants aux techniques de sutures, cependant la résistance des tissus est bien différente de celle rencontrée au niveau des tissus de la cavité buccale.



Figure 9: Le pied de cochon: un simulateur simple pour l'entraînement aux techniques de sutures

1.6.7.2. Les unités de formation dentaire

Le but de ces simulateurs souvent appelés fantômes, est de fournir un environnement de travail le plus proche possible des conditions réelles sur le plan de l'ergonomie.

Le premier fantôme fut créé en 1894 par Oswald Fergus afin d'augmenter le réalisme ³⁰, et ce type de simulateur constitue encore aujourd'hui la norme dans les Facultés d'odontologie.

Un modèle de travail appelé « typodont » ⁶ est monté dans un mannequin dont les mâchoires sont articulées.

L'ensemble de l'instrumentation traditionnelle est également accessible et l'étudiant peut organiser son poste de travail de façon à apprendre à bien se positionner ³⁰.

Les modèles utilisent généralement des dents en résine (type Frasaco®), dont l'aspect et la densité (souvent homogènes) ne reflètent que partiellement la réalité clinique (pas de carie, anatomie standardisée non modifiable).

Le coût d'acquisition, l'entretien et l'utilisation de dents non réutilisables représente un coût important pour les centres de formation.

De plus, l'évaluation du travail réalisé est confiée aux enseignants.



Figure 10: Exemple d'unité de formation dentaire (DESplus de chez Kavo)



Figure 11: Simulateur de mâchoire (Kavo® système)



Figure 12: Exemple de dents en résine utilisées en formation, un coût non négligeable (environ 62000€ par an à la Faculté d'Odontologie de Nancy)

1.6.7.3. Les unités de formation augmentées

Le fonctionnement est identique, il s'agit d'unités de formation comprenant un fantôme muni d'une mâchoire articulée et d'un modèle de travail.

Afin de permettre une évaluation objective des préparations, de favoriser l'auto-formation et de mieux comprendre les éventuelles erreurs, il est possible d'adjoindre au système classique un dispositif de repérage spatial en temps réel couplé à un ordinateur.

Cela va permettre aux étudiants de visualiser sur un écran les défauts et les corrections à apporter à leurs préparations.

✓ **Le Dentsim®**

Le Dentsim® de DenX fait partie de ces nouveaux systèmes que l'on peut utiliser sur des unités de formation classique.

L'avantage est de pouvoir conserver tout le système de travail classique.

Un dispositif permet le repérage de l'outil.



Figure 13: dispositif de repérage couplé à un contre angle classique
Station de travail (Dentsim®)



Figure 14: Unité de formation avec Dentsim® (camera de repérage en haut à droite.)

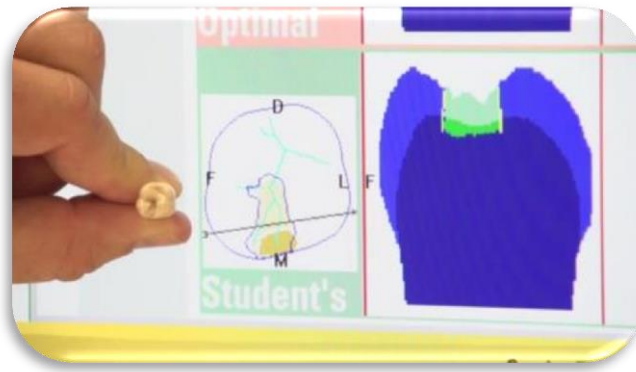


Figure 15: Le travail effectué avec évaluation sur le Dentsim®

Ces procédés d'aide et d'évaluation ont fait l'objet de plusieurs recherches³⁹⁻⁵².

Les premiers travaux de Buchanan et coll. sur le Dentsim® ont montré que les étudiants apprenaient plus vite, réalisaient plus d'exercices par heure et nécessitaient plus d'évaluation que pour l'entraînement traditionnel.

✓ **EPED System**

Utilisant la même approche que le Dentsim®, ce simulateur est fabriqué à Taiwan. Développé depuis 2010 par Eped et commercialisé sous le nom de CDS-100 system, il n'a pas encore fait l'objet de publication.



Figure 16: EPED system

I.6.7.4. Les nouveaux simulateurs haptiques

Ces nouveaux simulateurs permettent aux étudiants de travailler leur dextérité manuelle dans un environnement le plus proche possible de la réalité clinique. Ils sont généralement constitués d'une interface numérique permettant d'afficher des situations cliniques en 3D couplée à un dispositif électromécanique permettant de fournir les sensations haptiques.

Différents simulateurs orientés dans le domaine de l'odontologie sont disponibles sur le marché avec pour chacun des spécificités.

✓ Voxel-man® simulateur

Le Voxel-man® est un simulateur haptique utilisé dans l'enseignement de la chirurgie ORL⁵³⁻⁶² mais également en odontologie^{37,63}

Il est composé de 2 dispositifs haptiques (Geomagic®) permettant d'interagir avec l'environnement virtuel.

La scène est visible sur un écran en 3D grâce aux lunettes qui sont portées par l'utilisateur.

Différents exercices sont proposés, la préparation cavitaire pour restauration directe et indirecte, et l'entraînement pour des chirurgies d'apicectomie.

Les premières études ont été menées pour valider l'intérêt de cet outil. Les auteurs⁶³ ont montré dans une étude portant sur l'entraînement à la chirurgie d'apicetomie que les étudiants ayant bénéficié d'un entraînement sur simulateur perforaient moins, étaient moins iatrogènes et faisaient des cavités de taille plus réduite que les étudiants entraînés de façon classique.



Figure 17: Vue générale du Voxel Man®

✓ **Virteasy®**



Figure 18: Aspect général du simulateur Virteasy® (1^{ère} génération)

Le Virteasy® est un simulateur haptique permettant d'effectuer différentes tâches en odontologie. Il est constitué d'un ordinateur relié à 2 écrans : l'écran de contrôle est un écran tactile ; le deuxième écran permet d'afficher une image 3D afin de permettre à l'utilisateur de visualiser la scène en 3D. Un dispositif haptique (Phantom desktop ® de chez Sensable) constitue le point central de ce simulateur. Il permet de fournir un feed back à l'utilisateur. Le logiciel propriétaire Virteasy® permet de simuler différents cas cliniques allant de la préparation cavitaire pour des caries à la réalisation de sites implantaires en passant par la préparation de couronnes.



Figure 19: Le dispositif haptique Geomagic Touch X (anciennement phantom desktop® de chez sensible) utilisé pour le Virteasy®

Une nouvelle version de ce simulateur comporte un deuxième dispositif qui permet de simuler un miroir.



Figure 20: Nouvelle version du simulateur Virteasy®

Une première étude issue de ce travail de recherche sur ce simulateur nous a permis de démontrer l'intérêt de cet outil dans l'apprentissage gestuel en implantologie³⁶.

✓ **HapTEL™ :**

Le projet HapTEL™ (tel= Technology-Enhanced Learning) initié par le « King's college de Londres » vise à développer un simulateur haptique orienté dans le domaine de l'odontologie. Il est composé d'un ordinateur avec écran 3D permettant d'observer la scène de travail. Un dispositif haptique créé au sein du King's College de Londres permet de retranscrire les sensations haptiques lors de la préparation cavitaire.

Une étude récente utilisant ce simulateur ⁶⁴ a montré que les étudiants avaient tendance à surestimer leurs compétences par rapport à l'évaluation des enseignants.



Figure 21: Simulateur hapTEL

✓ **Simodont®**

Issu du travail de la société Moog® spécialiste dans le développement de plateformes hydrauliques dans de nombreux domaines et particulièrement dans la simulation aéronautique, en collaboration avec ACTA, ce simulateur a vu le jour en 2010 au congrès de l'ADEE (Association for Dental Education in Europe).

Ce simulateur permet aux étudiants d'acquérir les bases dans le domaine de la préparation cavitaire en odontologie.

Il est composé d'un ordinateur et de mini projecteurs qui diffusent la scène de travail en 3D que l'étudiant peut observer à l'aide de lunettes 3D. L'interaction et le retour de force sont opérés à l'aide d'un dispositif mis au point par la société Moog® qui permet de simuler un contre angle et un miroir.

Ce simulateur est présent dans plusieurs facultés dans le monde, notamment à l'université d'ACTA à Amsterdam qui possède plus de 40 simulateurs de ce type et qui les utilise pour l'enseignement des étudiants en préclinique.

Ce simulateur permet actuellement :

- de tester la dextérité manuelle et les compétences psychomotrices des étudiants grâce à différents exercices
- de réaliser des exercices de préparation cavitaire de dentisterie restauratrice.
- de réaliser le diagnostic et prévoir le plan de traitement de différents cas cliniques.
- il fonctionne aussi bien pour gaucher que pour droitier.

Actuellement il permet de réaliser des exercices de fraisage de difficulté croissante avec l'utilisation d'un miroir. Dans le futur il est prévu de pouvoir l'utiliser pour des interventions parodontales et de prothèse fixe.



Figure 22: Le Simodont® en assemblage



Figure 23: Utilisation du Simodont®

✓ **Kobra®**

Fabriqué par la société Forrslund. Le simulateur Kobra® propose aux étudiants de s'initier à l'extraction de la troisième molaire mandibulaire en réalisant le dégagement chirurgical. Le simulateur est composé d'un dispositif haptique de type Geomagic®, d'un ordinateur et d'un écran 3D.

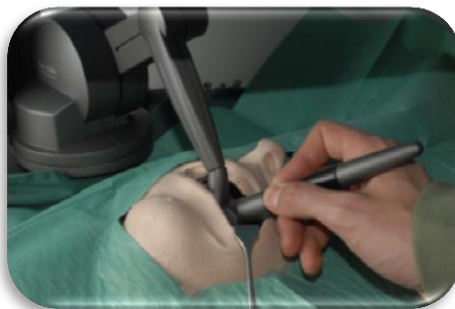


Figure 24: Utilisation du simulateur Kobra®



Figure 25: Vue d'ensemble du simulateur Kobra®

✓ **Periosim®**

Le Periosim® permet de former les étudiants au diagnostic, sondage et détartrage en parodontologie. Il est composé d'un dispositif haptique de type Geomagic comme dans le simulateur (Voxel man®, Virteasy®, Kobra®) couplé à un ordinateur ; les images sont visualisées sur un écran traditionnel.



Figure 26: Aspect du Periosim®

Sternberg et coll. ont mis en évidence dans leur étude ⁶⁵ que les sensations procurées par ce simulateur étaient très réalistes pour les dents mais moins pour la gencives ; que les images étaient de bonnes qualités et qu'il fallait envisager d'autres études pour valider le potentiel éducatif de ce dispositif.

✓ **Robot patient : (Dentaroid®)**

Il s'agit d'un mannequin haute-fidélité pour l'odontologie ⁶⁶. D'apparence féminine et mesurant 157cm, il a été développé à l'école de Showa au Japon en partenariat avec Tmusk CO.Ltd (Fukuoka, Japan). Il comporte 8 degrés de liberté au niveau de la tête et peut réaliser des mouvements autonomes. La salive et la parole peuvent également être simulées sur ce patient.

Le simulateur est habillé de vêtements, les tissus sont reproduits à l'aide de silicone, et les mouvements de déglutition de la langue peuvent être simulés, allant jusqu'au réflexe nauséeux.

L'instructeur peut contrôler à distance les mouvements du patient.



Figure 27: Aspect global du patient robot



Figure 28: Simulateur patient robot

I.7. Objectifs de la thèse

L'enseignement pratique de l'Odontologie à l'aide de la simulation traditionnelle pré-clinique (Typodont) nécessite comme pour le compagnonnage traditionnel clinique une inter-relation/action fréquente pour fournir à l'apprenant les informations nécessaires à sa progression. Avec la révolution numérique, une nouvelle stratégie pédagogique pourrait être proposée afin de renforcer le compagnonnage traditionnel dans le but ultime de tendre vers une excellence et une certification des gestes thérapeutiques.

Le compagnonnage numérique *i.e.* la simulation virtuelle haptique, grâce à des retours d'informations fréquents et objectifs, est un nouvel outil en devenir. En prenant comme point de départ l'enseignement de l'implantologie orale, et au travers de différentes expérimentations pratiques, nous avons voulu :

- (i) évaluer l'impact de la simulation haptique sur la formation en odontologie en nous focalisant sur l'implantologie et la dentisterie restauratrice.
- (ii) définir de nouveaux paramètres pédagogiques pour essayer de les évaluer objectivement et estimer l'importance de la vision 3D en simulation.

Ceci constituait le fondement de notre recherche présentée dans ce parcours doctoral.

II. Travaux réalisés

II.1. Impact de la simulation haptique dans l'enseignement de l'implantologie

II.1.1. Résumé de l'article : « Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology » (Article publié dans le Biomed International research IF=2.88)

En implantologie, les techniques visant à remplacer l'organe dentaire déficient ont beaucoup évolué, durant les 30 dernières années, avec les demandes du patient. Celui-ci ne se contente plus d'un appareil amovible mais souhaite dans la plupart des cas bénéficier de restaurations fixes. L'implantologie, à ce titre, fait partie des avancées les plus notables dans le domaine de l'odontologie. Autrefois réservé à quelques praticiens, l'enseignement de l'implantologie devient de plus en plus une réalité tangible dans le cadre de la formation initiale, du moins sur le plan théorique, et surtout dans le cadre post universitaire sur le plan pratique.

Le nombre de praticiens souhaitant acquérir les compétences nécessaires à la réalisation de ces actes augmente, alors que le nombre d'enseignants, lui, a tendance à stagner voire à diminuer. Par ailleurs, le nombre croissant de systèmes implantaires qui sont mis sur le marché ne permet pas d'avoir une vue exhaustive de tout ce qui se fait dans le domaine de l'implantologie, lors de la formation initiale.

La chirurgie implantaire, au même titre que les autres chirurgies est à l'heure actuelle en pleine (r)évolution.

Ce travail a débuté par une évaluation des critères discriminants de cette activité de forage, sur un modèle de résine, entre le groupe des chirurgiens-dentistes confirmés (Experts) et le groupe de jeunes confrères en 3^{ème} année n'ayant aucune expérience en implantologie (Novices). L'impact de Virteasy® comme outil d'enseignement et de progression en implantologie a été évalué chez un autre groupe d'étudiants en 3^{ème} année n'ayant aucune expérience au préalable en implantologie. Un parcours en huit sessions leur a été proposé. Ces étudiants ont ensuite été évalués sur les mêmes examens de forage. Un questionnaire complète la phase investigationnelle de notre étude.

Nous gardons cependant à l'esprit que cette expérience ne représentait qu'une partie de l'acte implantaire (partie osseuse, vision dans l'espace) et ne permet pour le moment pas de retranscrire les phases d'incisions, de sutures et de gestions des tissus mous.

Nous avons essayé au cours de notre étude d'apprécier l'intérêt d'un nouveau simulateur, le Virteasy® comme outil pédagogique en chirurgie implantaire. Nous avons tout d'abord reproduit un exercice du simulateur dans le monde réel par la réalisation d'un forage dans un modèle en résine afin de déterminer la validité de construction (capacité de différencier un novice d'un expert). Notre modèle a été efficace car il a permis de faire ressortir les différences d'approche et de capacité opératoire des trois populations étudiées, les novices, les simulateurs et les experts.

A travers notre expérience, nous avons réussi à distinguer trois populations, les novices, les étudiants entraînés et les experts, et ce de façon objective par la réalisation de mesures simples sur des modèles en résine. Nous avons pu noter une amélioration des paramètres pour le groupe simulateur comparé au groupe novice. Cependant la réalisation de ce type d'exercice sur simulateur « classique » nécessite du temps pour la réalisation des modèles et pour l'évaluation des résultats. Afin de compléter la formation en implantologie, la simulation « haptique » peut s'inscrire parfaitement dans le parcours pédagogique, sans pouvoir totalement se substituer aux techniques traditionnelles. La simulation numérique permet d'améliorer les compétences des étudiants comme nous avons pu le constater lors de l'entraînement sur le simulateur. L'évaluation fournie par la machine est instantanée par comparaison à un simulateur « classique ». Les exercices peuvent être refaits de façon illimitée sans surcoût, mais certains paramètres d'évaluation devraient être plus précis. Bien évidemment, il serait intéressant de poursuivre l'étude sur une population plus importante, sur une plus longue période pour apprécier l'évolution des critères de performance sur le long terme, de façon à déterminer une durée minimum de formation. Pour être pleinement efficace, ce simulateur nécessite un accompagnement par des séances de briefing/ débriefing afin de rassurer les participants comme le suggère la HAS dans son rapport sur la simulation en 2012.

Résumé :

Introduction : L'apprentissage de la chirurgie implantaire, comme dans les autres disciplines de santé est actuellement en pleine évolution. Objectif de l'étude : valider l'utilisation d'un simulateur haptique, un simulateur d'entraînement et d'apprentissage pour accomplir les gestes de base en implantologie.

Matériels et méthode : Au total ce sont 60 participants dont 40 étudiants en 3eme année de chirurgie dentaire sans connaissance en implantologie (divisés en deux groupes, 20 novices, 20 novices entraînés par simulation) et 20 praticiens expérimentés en implantologie (nombre d'implants >15). Un exercice basique de forage implantaire est réalisé par les différents groupes pour évaluer leur compétence.

Résultats : Les résultats du groupe entraîné par simulation tendent à se rapprocher significativement du groupe expérimenté.

Conclusion : La simulation haptique apporte un réel bénéfice à l'entraînement en chirurgie implantaire. Les effets à long terme et pour des exercices plus complexes doivent être évalués.

II.1.2. Article : « Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology » (Article publié dans le Biomed International research IF=2.88)

Research Article

Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology

David Joseph,^{1,2,3} Jean-Philippe Jehl,⁴ Pablo Maureira,¹ Cyril Perrenot,¹ Neal Miller,² Pierre Bravetti,⁵ Pascal Ambrosini,² and Nguyen Tran^{1,3}

¹ School of Surgery Nancy-Lorraine, University of Lorraine, 54505 Vandœuvre-les-Nancy, France

² Department of Periodontology, Faculty of Dentistry, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

³ UMR-S1116, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

⁴ Institut Jean Lamour, UMR 7198, CNRS, Université de Lorraine, 54011 Nancy, France

⁵ Collegium Santé, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

Correspondence should be addressed to David Joseph; david.joseph@univ-lorraine.fr

Received 14 December 2013; Accepted 10 January 2014; Published 20 February 2014

Academic Editor: Patrick H. Warnke

Copyright © 2014 David Joseph et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Background. The teaching of implant surgery, as in other medical disciplines, is currently undergoing a particular evolution. *Aim of the Study.* To assess the usefulness of haptic device, a simulator for learning and training to accomplish basic acts in implant surgery. *Materials and Methods.* A total of 60 people including 40 third-year dental students without knowledge in implantology (divided into 2 groups: 20 beginners and 20 experiencing a simulator training course) and 20 experienced practitioners (experience in implantology >15 implants) participated in this study. A basic exercise drill was proposed to the three groups to assess their gestural abilities. *Results.* The results of the group training with the simulator tended to be significantly close to those of the experienced operators. *Conclusion.* Haptic simulator brings a real benefit in training for implant surgery. Long-term benefit and more complex exercises should be evaluated.

1. Introduction

Conventional training of a surgeon involves the acquisition of a number of skills, a long process that requires considerable attention to ultimately acquire a satisfactory base of knowledge, to facilitate apprehension and comprehension of situations, formulate diagnoses, guide decision making, and strengthen manual and technical skills thus leading to improved therapeutic abilities [1–3]. As higher surgical performance and standardization of training have become normative and safety objectives, awareness coming from the United States of America [4] and recently from the European Union [5] has stressed the urgency for institutions to invest in new teaching strategies such as simulation [6] and accredited residency-training programs in order to reduce variability in training methodology, technical skill, and the trainee's confidence and competence at the time of graduation [7].

In dental implantology, techniques and technologies are constantly evolving, and manufacturers are marketing new

products that progressively help to push back a little more the limits of implant restoration. Whilst the act of drilling may seem at first relatively simple, implantology involves a much more complex global prosthetic treatment plan which requires full integration of key areas such as 3D structural acquisition, system operations, prosthetic requirements, visual representation, and *in fine* expectation of functional and aesthetic restoration. However, there is still no clear consensus in the certification of implant practitioners as recalled by the first European Consensus Conference in 2008 in Prague [8] stigmatizing, amongst other recommendations, very diverse training programs throughout Europe both at undergraduate and postgraduate levels that might hamper proficiency required in formative development.

Based on the performance of a basic act in implant surgery, the drilling procedure, the objective of our prospective study was to determine the contribution of a haptic simulator for simulating implant surgery, as a valuable teaching tool for training of third-year students in dentistry.

The expected application of this research is to provide an adjuvant environment for learning implantology and to improve its assessment and proficiency.

2. Materials and Methods

2.1. General Study Design. The research was conducted at the School of Surgery of Nancy-Lorraine, Lorraine University, France. A total of 60 practitioners, dentists ($n = 20$) or third-year dental students ($n = 40$), all recruited from the Faculty of Dentistry, University of Lorraine, were included in this study. This prospective randomized observational study was approved by the BIOSE, the doctoral review board of the Lorraine University.

After informed consent, 40 third-year dental students were enrolled. Exclusion criteria were any previous experience with drilling training and with implant surgery. Students were then randomized into two groups: the "Novice" group ($n = 20$, 10 women and 10 men, mean age = 22 years) and the "Simulation" group ($n = 20$, 10 women and 10 men, mean age = 22 years). Both groups were instructed conventionally about the drilling from a PowerPoint presentation except that students in the "Simulation" group received prior individual training on the Virteasy simulator. Results were compared to an "Experienced" group which included 20 dentists (11 women and 9 men, mean age = 39.3 years) with a minimum experience of 15 placed implants (range: 15 implants to more than 800). Before starting any exercises in this study, people of this group had also received the PowerPoint presentation of drilling instruction.

2.2. The Simulator and Exercises. To be able to compare simulator trained students with untrained students and experienced practitioners, we started with the training of the simulator group.

Virteasy is one of the first dental simulators on the market to reproduce the sensations of implant surgery. Briefly, it consists of a PC-type computer running Windows 7, a touch-screen control for interacting with simulator software, a 3D screen reflecting in a mirror, stereoscopic glasses for viewing the 3D scene, a plastic contra-angled handpiece connected to force feedback arm device (Phantom) to transcribe the tactile sensations of drill in the bone, and a foot pedal to start the virtual handpiece in the simulator (Figure 1(a)).

Before starting the exercise, participants performed simple exercises to familiarize themselves with the operation of the simulator, the use of virtual handpiece (Figure 1(b)), adjust their positions, and feel the feedback force provided by the machine. For example, a simple drill exercise on virtual blocks was proposed. These blocks mimicked the four bone densities described in the literature [9]; block 1 corresponds to a highly cortical bone and block 4 is a predominantly cancellous bone (Figure 1(c)). Using a virtual Astra 3.2 mm diameter drill to bore 11 mm deep, the exercise was repeated as many times as desired by the participant.

Then, each participant was given the same explanation of the implant selection and positioning, using specific scanner software. During this exercise, the students were familiarized with implant planning software and notions concerning

diameter, implant shape, and positioning. Moreover, each participant was shown the mark on the drill not to exceed (11 mm).

After determining the location and the type of implant, each participant was asked to perform the procedure corresponding to the virtual "expert" planning furnished by the simulator. This reference is determined by the machine as the ideal planning. The intervention was carried out 8 times, 4 times in the presence of an instructor and 4 times in total autonomy. The simulator can provide assistance for the positioning of the point of impact and the three-dimensional positioning of the implant (Figure 1(d)). During the 8 trials, the student kept using the computer assistance to determine the point of impact which is the ideal position of the center of the future implant. Assistance to identify the three-dimensional position was provided only during the first 4 trials (Figure 1(e)).

The virtual material used for each test was a bur to mark the point of impact, a cylindrical 2 mm drill-driver, a cylindrical 2.85 mm drill, a 3.5 mm drill, and a conical 3.5/4.7 mm drill.

For each test, different parameters were recorded in an Excel spreadsheet:

- (i) the position difference (in mm) relative to the reference position (position of the point of impact in relation to the position indicated by the simulator),
- (ii) the average-difference angle (°) with respect to the reference position (difference from the vestibular-lingual and mesial-distal angulation),
- (iii) the drilling depth (in mm, depth from the top of the ridge),
- (iv) the total time (in seconds) of the exercise,
- (v) the actual drilling time (time in seconds during which the drill bit is rotated during the exercise),
- (vi) the eventual perforations identified visually (Figure 1(f)).

2.3. Procedure Presentation. Before drilling the resin model to evaluate their skills in implantology, all participants received basic instructions by means of a PowerPoint presentation explaining the different stages of implementation, the goals to achieve, and more particularly the pitfalls to avoid.

2.4. Creation of Synthetic Resin Model and Evaluation. To compare the three groups, we created a model stemmed from the scanner slices of the simulator exercise. The edentulous ridge was modeled using sheets of soft wax, 1 mm thick, reproducing the scanner slices from the simulator's software, at original scale. The different sheets were then assembled to form a block which was in turn inserted into a plaster model. An impression was made and a first plaster duplicate was made to verify the volume of the ridge and be sure it corresponded to the CT scan slices. Sixty resin (RenCast 52/53 Isocyanatethe FC/FC 52 Polyol) replicates were made from the master model. In order for the model to be radioopaque, 30% of barium sulphate was added. Several trials using liquid

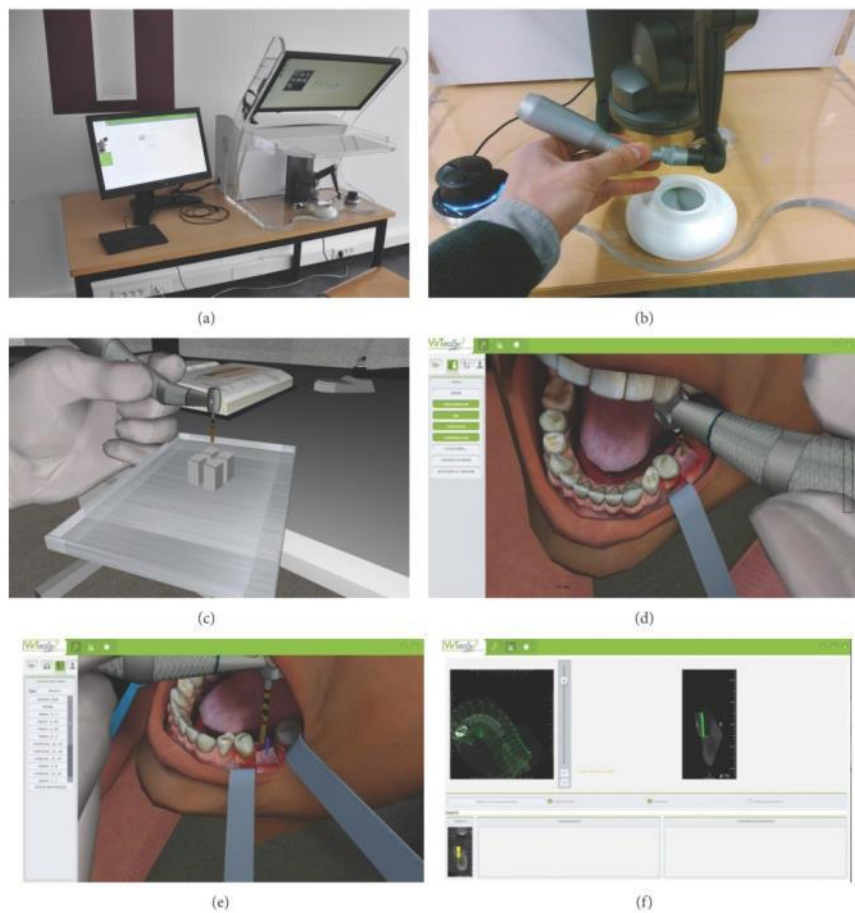


FIGURE 1: Haptic simulator and virtual exercises. (a) Overview of the simulator. (b) Positioning of the haptic contra-angled handpiece. (c) Image of the virtual drilling procedure. (d) Virtual implant site preparation. (e) Blue angulation guide. (f) Grading of virtual drilling (green is reference and black is actual drilling).

iodine were unsuccessful due to a problem of polymerization of the resin [10].

A transparent acrylic position key was used to calculate the angular deviation (mesiodistal and/or buccolingual) between the reference axis and the actual drilling of each model. To be sure that all measurements were performed in the same conditions, it was important that all models be scanned in the same way. For this purpose two silicone positioning bases were confectioned to stabilize the models in two well-defined positions, one to verify the mesiodistal angle and the other the buccolingual angle. The models were then passed through an X-ray image intensifier (ARCADIS Avantic, Siemens) and X-rayed in the two positions determined by

the silicone bases to record the angle deviations (see Figure 2 for an example).

The measurements of the position difference were performed using a periodontal probe. An electronic caliper was used to determine the drilling depth by measuring the portion of the last drill emerging from the model.

All participants received a model with a random number of anonymity so that the evaluation would be blind. Using a graduated periodontal probe, participants were to mark the center of the ridge in the buccolingual and mesiodistal directions according to information provided in the presentation. Once the impact point is determined, the drilling of the implant was performed using a standard set of drills:

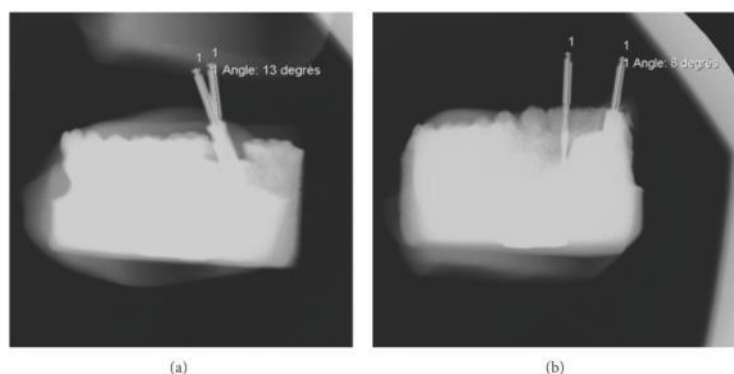


FIGURE 2: Evaluation of angle parameters with resin model. (a) Example of mesiodistal angle deviation. (b) Example of buccolingual angle deviation.

a bur-haired and different cylindrical drill (2 mm, 3.2 mm, 3.7 mm, 4.2 mm, 4.7 mm, and 4.85 mm). Thus, the participants were confronted with various difficulties such as working positions and limitation of the buccal aperture of the manikin. The evaluation was focused on

- (i) the correct centering of the targeted site,
- (ii) the presence or absence of perforation,
- (iii) the drilling depth,
- (iv) the deviation of the vestibulolingual direction relative to a reference axis on the control model,
- (v) the deviation of the mesiodistal direction relative to a reference axis on the control model,
- (vi) the global drilling time.

2.5. Statistical Analysis. The results were expressed as mean $\pm$ standard deviation from the mean ($m \pm SEM$). The one factor ANOVA or t -test two-tailed t was used to compare performance between groups. The frequency analyses were made using the Fischer test. Probability $P < 0.05$ was considered significant. Analyses were made possible through the GraphPad Prism (GraphPad Software San Diego, CA, USA).

3. Results

3.1. The Impact of Simulation Training on the Quality of Drilling. Scores obtained on the simulator by the group of 20 participants from the third-year of dental surgery are displayed in Figure 3.

The progression of the centering precision is illustrated in Figure 3(a). A clear trial-dependent improvement was documented. The mean initial position was off the mark by 0.86 ± 0.12 mm, but after 8 exercises the deviation was reduced to 0.54 ± 0.06 mm ($t = 2.247$, $P = 0.0310$ versus the 1st trial). However, two phases of evolution could be identified. During the first 4 trials under guidance (position

and angle), a progressive and significant improvement was documented; the mean position deviation for the fourth test was 0.55 ± 0.06 mm from the ideal center ($t = 2.038$, $P = 0.04$ versus the first trial). However this progression stagnated once the drilling angulation guidance was disabled.

Similar profile was documented with the difference in vestibulolingual and mesiolingual angulation (Figure 3(b)). Indeed, the difference in angulation was of $9.44 \pm 1.16^\circ$ initially and was gradually reduced to a value of $5.9 \pm 0.67^\circ$ after the fourth attempt ($t = 2.66$, $P = 0.0121$). When angulation virtual pointer was no longer available, accuracy stopped progressing. However, performance after the 8th trial was still significantly more accurate than after the initial trial, the angle deviation being $6.17 \pm 0.94^\circ$ ($t = 2.297$, $P = 0.0288$).

The drilling depth was also recorded and its change over time is shown in Figure 3(c). Unlike the two previous parameters, steady progress has been well highlighted here going from an initial drilling depth average of 11.64 ± 0.12 mm to an average of 11.27 ± 0.11 mm at the end of the training ($t = 2.195$, $P = 0.0310$).

For each trial, the presence or absence of perforations was determined (Figure 3(d)). Of the total 160 virtual trials, there were 33 cortical perforations made by different 13 participants, 11 while virtual guidance was activated and 22 when it was not. When in use, the virtual guidance greatly contributes to avoiding these occurrences.

Finally, the simulator measures speed in two different ways, the overall time and the actual drilling time (Figures 3(e) and 3(f)). Repeated practice with the simulator significantly improved these parameters. For instance, the initial drilling time was of 106 ± 46 sec and the initial overall total of 470 ± 131 sec. At the end of the training with simulator, all these parameters were significantly improved decreasing to 62 ± 26 sec for the drilling time and 272 ± 82 sec for the entire exercise (all $P < 0.05$ versus baseline).

3.2. Comparative Study of Drilling Parameters on the Outcome of Resin Model Scanners (Validity of Construction). Figure 4

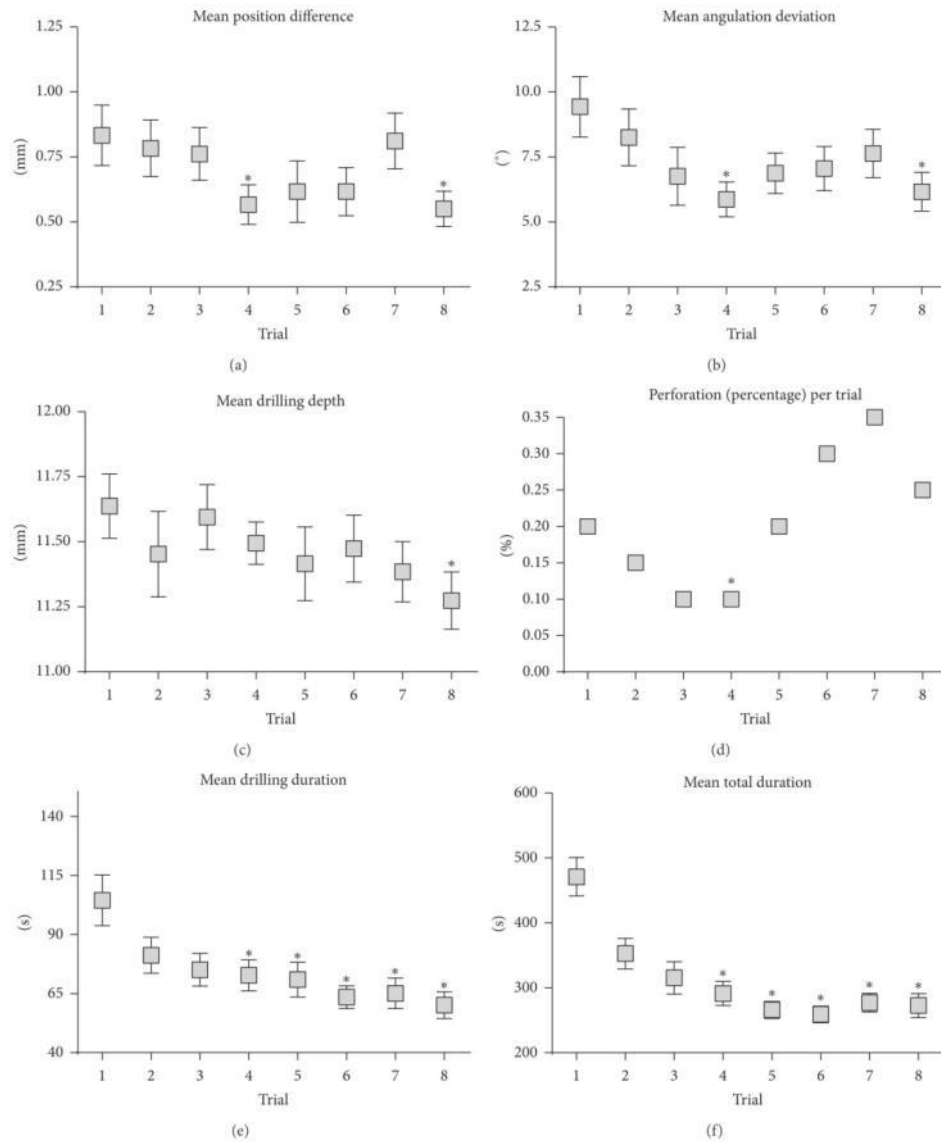


FIGURE 3: Evolution of drilling outcomes with simulator training. (a) Mean position difference. (b) Mean angulation deviation (mean of deviations for both buccolingual and mesiodistal angulations). (c) Mean drilling depth. (d) Perforation (percentage) per trial. (e) Mean drilling duration. (f) Mean total duration. Results are expressed as $m \pm SEM$, $n = 20$. * $P < 0.05$ versus 1st trial.

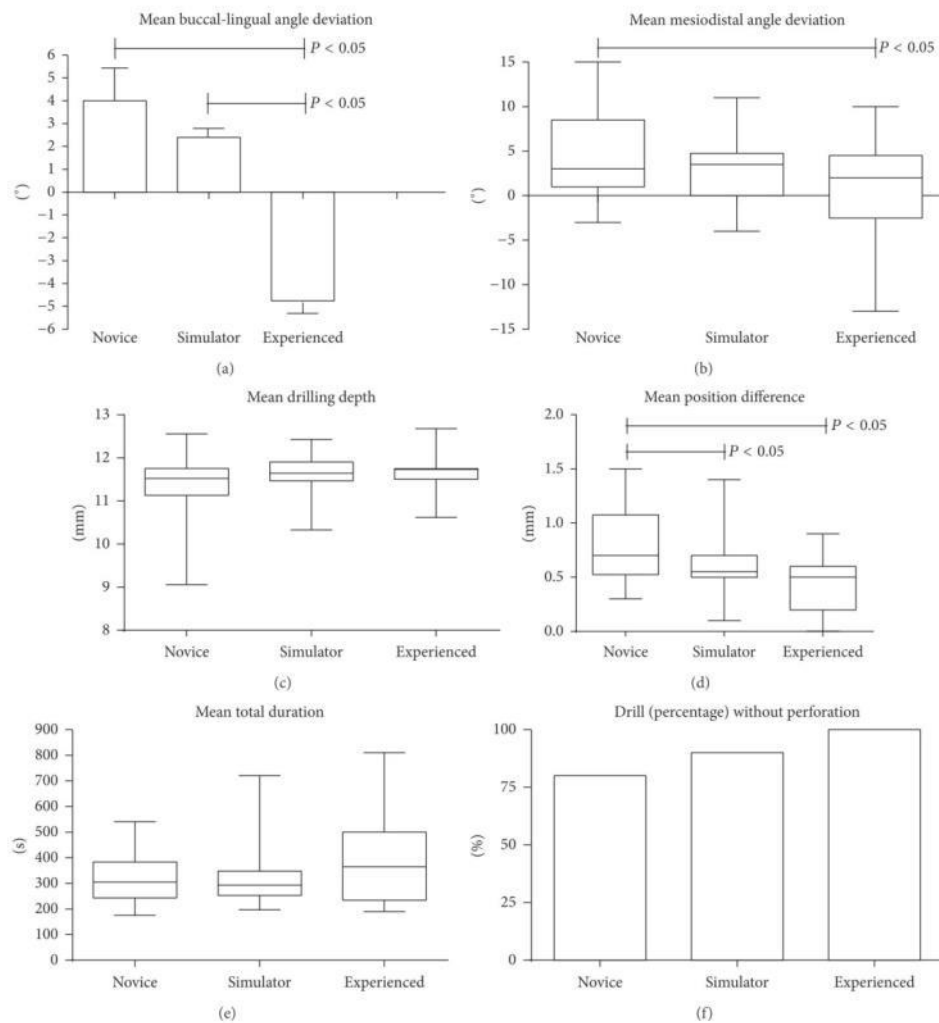


FIGURE 4: Comparative drilling outcomes of "Experienced," "Simulation," and "Novice" group on resin model. (a) Mean buccolingual angle deviation. (b) Mean mesiodistal angle deviation. (c) Mean drilling depth. (d) Mean position difference. (e) Mean total duration. (f) Site preparation (percentage) without perforation. Results are expressed as $m \pm SEM$, $n = 20$ per group. * $P < 0.05$ versus Experienced.

shows the different parameters to highlight the quality of drilling observed in the three groups.

Regarding the difference in buccolingual angulation, there was a marked difference in operational approaches (Figure 4(a)). For the "Novice" group, the error outlined a drilling axis which tended to go from the buccal side to the lingual side with an average deviation angle of $+4.0^\circ \pm 1.4^\circ$ compared

to the reference axis. With "Experienced" practitioners, the approach was reversed, the head of the implant facing the lingual side and the apical end oriented towards the buccal cortical; the average buccolingual deviation was $-4.8 \pm 1.1^\circ$ ($t = 5.004$, $P < 0.0001$ versus "Novice"). After completing eight simulation sessions, 3rd year students in the "Simulator" group still drilled with a slightly buccolingually directed axis,

the mean deviation being measured as an angle of $+2.4 \pm 0.7^\circ$. Although the significance level was not reached between the "Novice" and "Simulation" groups, the drilling direction was more accurate in the simulator group; however it was still far from the mean axis chosen by the "Experienced" group ($t = 5.516$, $P < 0.0001$, "Simulation" group versus "Experienced" group).

Less caricatural pattern was seen when measuring the difference in the mesiodistal angulation (Figure 4(b)). The experienced practitioners tended to follow instructions more precisely; the mean deviation from the reference was a mere $0.94 \pm 1.33^\circ$. The novices were prone to drilling with a mesiodistal incline compared to the reference axis. The mesiodistal deviation was $4.71 \pm 1.22^\circ$ and the difference with the experienced practitioners was statistically significant ($t = 2.085$, $P = 0.045$). Students trained on the simulator had a better score ($2.70 \pm 0.89^\circ$) compared to "Novice" although this difference was not significant due to high variability of the values recorded in the "Novice" group ($t = 1.350$, $P = 0.1856$).

Another important factor is the drilling depth. It is often necessary to drill slightly deeper while avoiding the environing anatomical elements, especially in a situation where the dental nerve canal is near. Figure 4(c) shows that all participants tended to make preparation by drilling slightly over the requested 11 mm. Values were 11.65 ± 0.08 mm in the "Experienced" group, 11.64 ± 0.11 in the "Simulation" group, and 11.43 ± 0.17 in the "Novice" one. Again, there was significant variability in the results from the "Novice" groups.

The positioning of the point of impact (centerline) on the ridge was another important factor of implant outcomes. When using the centering error parameter (Figure 4(d)), computed as the sum of the mean differences of position (mesiodistal and buccolingual directions) between each test and the virtual reference drilling, our analyses found that the results from "Experienced" were close to the expected ideal centering. Their error was only 0.43 ± 0.05 mm from the center. The centering error of "Novice" was more pronounced with a distance of 0.85 ± 0.09 mm from the ideal center ($P < 0.001$ versus "Experienced"). On the other hand, the "Simulator" group performed fairly well with a score of 0.57 ± 0.06 mm, a significant improvement compared to the "Novice" group ($t = 2.502$, $P = 0.0168$) but without reaching the level of the "Experienced" group.

While the average drilling time was about the same for all three groups (approximately 350 seconds, Figure 4(e)), the quality of the preparation of the implant site, estimated by the presence or absence of cortical perforation, was significantly different in the "Novice" group and the "Simulation" group when compared to the "Experienced" practitioners (Fisher test, $P = 0.02$). The frequency of perforation was 20% for "Novice" and 10% for the simulation trained students (Figure 4(f)).

4. Discussion

Implant surgery training, like all surgical training, is based on acquisition of fundamental knowledge while learning to

perform procedures both efficiently and safely. To achieve a successful esthetic result, the very sensitive procedure of implant placement allows little room for error and demands a thorough, careful treatment planning combined with excellent clinical skills technique. Recently, it has been stressed to promote new learning environment evolving towards systems that can address the training needs of a growing number of practitioners with fewer instructors and yet allow numerous repetitions of specific procedures while objectively assessing the progress in acquiring skills, and all of this safely. In this particular context, we have studied benefits provided by a new haptic simulator.

Suebunukarn et al. [11] concluded that the use of haptic technology increased student performance in achieving basic dentistry procedures. This was already mentioned in a previous study by Buchanan [12], which showed that students' learning curve was significantly enhanced when they trained with the new technology. Sternberg et al. [13] demonstrated the usefulness of a haptic stimulator named Voxel-man towards learning apicectomy. From what we observed during implant site preparation, this technology helps students progress better and faster. The Prague Consensus Conference in 2008 was the first basis in an attempt to harmonize dental implant training in Europe [8]. This education must cover all fields from diagnosis to prosthetic treatment, including communication with the patient and legal aspects relative to implantology. If educators strive to make their teaching accessible, it is nonetheless necessary to develop methods to quickly and easily assess the progress that is made. The manual skills and gestures are surely more difficult to evaluate objectively than fundamental knowledge. Practical training on models or anatomical body parts involves heavy investment in equipment and material that must be renewed at each use. This was the approach we used when comparing drilling skills between novice students, stimulator trained students, and experienced practitioners. Digital simulators that avoid some of these expenses have been gaining attention since the early 2000s [14, 15]. Simulators with force feedback haptic arms have been successfully tested in restorative dentistry, oral surgery, and many medical fields [1-3, 11, 16-22] and in periodontology.

This guided us in selecting the type of simulator that we used to train the students in the "Simulation" group. A rapid progression was observable for the different parameters. The group having trained on the simulator perforated the external cortical bone twice less frequently than the "Novice" group that had only received lectures on surgery. Simulators should enhance the learning curve [12, 23] and provide tactile sensations that cannot be acquired during lectures. During this evaluation, the differences between experienced practitioners and novices were very obvious especially for parameters of assessment angulation (buccolingual and mesiodistal), centering the implant and perforation. Regarding the angular indication, the mesiodistal approach (front to back), definitely easier to appreciate, showed a steady progress towards a perfect angle. Large heterogeneity in the obtained performance was the general characteristics of the "Novice" group. The simulation allowed reducing the gap between students and suggesting that the proposed training exercises

produced a favorable impact in the implementation of this act. The appreciation of the buccolingual angulation was less obvious at first glance. While we expected to see a difference in buccolingual angle close to 0° in "Experienced," they chose mainly to position the implant with an angle from inside to outside and from above down with the tip of the implant led to the vestibular side. The other two groups have carried out the reverse. In fact, it appears that the clinical experience of "Experienced" has made them prefer a position angle allowing them to avoid puncturing the much finer lingual cortex. The appreciation of the depth was another important point. In our study, if the average depth of drilling did not differ significantly, the expertise and training with simulator reduced interindividual variability. Reproducibility is crucial for procedure certification and patient safety. In this respect, the work of Ioannou et al. [24, 25] based on parameters characterizing the drilling carried out by students and experienced practitioners is revealing. For these authors, a good command of the applied force allows for optimum drilling and faster performance by experienced practitioners rather than novices. In the present study, although we were not able to study the applied force, the small difference between the experienced practitioners for the drilling depth parameter was consistent with the results of Ioannou et al. [24, 25].

Procedural safety is an important issue [26]. Although virtual procedures cannot totally replace reality, haptic simulation and repeat training enables residents to be more confident during their first operation. Time is another important factor. Simulators should reduce the duration of procedures performed by undergraduate students or residents which is beneficial to both patient and practitioner [27]. In the present study the time spent on the drilling procedure diminished significantly with the simulator training. Other researchers [24, 25] have demonstrated that experienced practitioners need less time to prepare an implant site. In order to determine consistent results and to define training goals for different educational levels (undergraduate, graduate, and continuing education) it will be necessary to accomplish studies over a longer period of time including more exercises. This will enable educators to establish guide lines for using haptic technology towards preparing students for surgery [12, 23, 28].

Another important aspect is the use of surgical guides. During training the presence or absence of these guides considerably conditions the results. We observed, for instance, good progression in adopting the right drilling angle as long as the angulation guide was in place and a stagnation or slight regression once it was removed. However, during surgery, the operator will not have this sort of indication, so it is necessary to determine how long trainees are going to depend on the guides before progressively doing away with them. As is already observed in the practice of aviation and recently in medical education, the briefing-debriefing procedure plays a crucial role when using simulation for learning purposes [29]. Debriefing serves as a feedback in order to determine the need to correct some of the information gleaned through the learning action. At the same time, it enhances the reflection phase of the learning cycle [29].

5. Conclusion

This is an experimental approach to using a simulator for implant surgery training. The large number of practitioners to train, the increasing demand for safe clinical procedures, and the need for self-evaluation and self-training [28] are among the numerous reasons haptic simulation is drawing greater attention as a new and modern way to learn. Our present study has evidenced that 3rd year students trained with a simulator perform much better than students without prior training and that their performances soon approach those of more experienced practitioners. Haptic technology has a place in under graduate and graduate education as well as continuing education [30].

This new technology could, at least partially, overcome educational difficulties related to an increasing number of students to train with ever constant resources [31, 32]. To do so, software must be developed to simulate multiple and increasingly difficult situations thus to fulfill different pedagogic objectives for diverse universities and training centers.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgment

The authors thank the French Society of Periodontology and Oral Implantology of Lorraine, France (SFPIO).

References

- [1] A. G. Gallagher, A. B. Lederman, K. McGlade, R. M. Satava, and C. D. Smith, "Discriminative validity of the minimally-invasive surgical trainer in virtual reality (MIST-VR) using criteria levels based on expert performance," *Surgical Endoscopy*, vol. 18, no. 4, pp. 660–665, 2004.
- [2] A. G. Gallagher, K. Richie, N. McClure, and J. McGuigan, "Objective psychomotor skills assessment of experienced, junior, and novice laparoscopists with virtual reality," *World Journal of Surgery*, vol. 25, no. 11, pp. 1478–1483, 2001.
- [3] K. Gallagher, J. Stephenson, R. W. Brown, C. Holmes, and P. Ballester, "Exploiting 3D spatial sampling in inverse modeling of thermochronological data," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 58, no. 1, pp. 375–387, 2005.
- [4] Y. Okuda, E. O. Bryson, S. DeMaria Jr. et al., "The utility of simulation in medical education: what is the evidence?" *Mount Sinai Journal of Medicine*, vol. 76, no. 4, pp. 330–343, 2009.
- [5] F. F. Bilotta, S. M. Werner, S. D. Bergese, and G. Rosa, "Impact and implementation of simulation-based training for safety," *Scientific World Journal*, vol. 2013, Article ID 652956, 6 pages, 2013.
- [6] C. Perrenot, M. Perez, N. Tran et al., "The virtual reality simulator dV-trainer is a valid assessment tool for robotic surgical skills," *Surgical Endoscopy*, vol. 26, no. 9, pp. 2587–2593, 2012.
- [7] H. Karle and The Executive Council, World Federation for Medical Education, "International recognition of basic medical education programmes," *Medical Education*, vol. 42, no. 1, pp. 12–17, 2008.

- [8] N. Mattheos, T. Albrektsson, D. Buser et al., "Teaching and assessment of implant dentistry in undergraduate and post-graduate education: a European consensus," *European Journal of Dental Education*, vol. 13, supplement 1, pp. 10–17, 2009.
- [9] U. Lekholm and G. Zarb, "Patient selection and preparation," in *Tissue-Integrated Prostheses: Osseointegration in Clinical Dentistry*, P. I. Brånemark, G. A. Zarb, and T. Albrektsson, Eds., pp. 199–209, 1985.
- [10] B. Vázquez, M. P. Ginebra, F. J. Gil, J. A. Planell, A. López Bravo, and J. San Román, "Radiopaque acrylic cements prepared with a new acrylic derivative of iodo-quinoline," *Biomaterials*, vol. 20, no. 21, pp. 2047–2053, 1999.
- [11] S. Suebnukarn, P. Haddawy, P. Rhienmora, P. Jittimane, and P. Viratket, "Augmented kinematic feedback from haptic virtual reality for dental skill acquisition," *Journal of Dental Education*, vol. 74, no. 12, pp. 1357–1366, 2010.
- [12] J. A. Buchanan, "Experience with virtual reality-based technology in teaching restorative dental procedures," *Journal of Dental Education*, vol. 68, no. 12, pp. 1258–1265, 2004.
- [13] N. von Sternberg, M. S. Bartsch, A. Petersik et al., "Learning by doing virtually," *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 36, no. 5, pp. 386–390, 2007.
- [14] C. Luciano, P. Banerjee, and T. DeFenti, "Haptics-based virtual reality periodontal training simulator," *Virtual Reality*, vol. 13, no. 2, pp. 69–85, 2009.
- [15] I. Marras, N. Nikolaidis, G. Mikrogeorgis, K. Lyrudua, and I. Pitas, "A virtual system for cavity preparation in endodontics," *Journal of Dental Education*, vol. 72, no. 4, pp. 494–502, 2008.
- [16] E. R. Wierinck, V. Puttemans, S. P. Swinnen, and D. van Steenberghe, "Expert performance on a virtual reality simulation system," *Journal of Dental Education*, vol. 71, no. 6, pp. 759–766, 2007.
- [17] E. Wierinck, V. Puttemans, S. Swinnen, and D. van Steenberghe, "Effect of augmented visual feedback from a virtual reality simulation system on manual dexterity training," *European Journal of Dental Education*, vol. 9, no. 1, pp. 10–16, 2005.
- [18] O. A. J. van der Meijden and M. P. Schijven, "The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review," *Surgical Endoscopy*, vol. 23, no. 6, pp. 1180–1190, 2009.
- [19] F. Quinn, P. Keogh, A. McDonald, and D. Hussey, "A study comparing the effectiveness of conventional training and virtual reality simulation in the skills acquisition of junior dental students," *European Journal of Dental Education*, vol. 7, no. 4, pp. 164–169, 2003.
- [20] K. Moorthy, Y. Munz, S. K. Sarker, and A. Darzi, "Objective assessment of technical skills in surgery," *British Medical Journal*, vol. 327, no. 7422, pp. 1032–1037, 2003.
- [21] P. Pohlenz, A. Gröbe, A. Petersik et al., "Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school," *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, vol. 38, no. 8, pp. 560–564, 2010.
- [22] S. Suebnukarn, R. Hataidechadusadee, N. Suwannasri, N. Suprasert, P. Rhienmora, and P. Haddawy, "Access cavity preparation training using haptic virtual reality and microcomputed tomography tooth models," *International Endodontic Journal*, vol. 44, no. 11, pp. 983–989, 2011.
- [23] J. A. Buchanan, "Use of simulation technology in dental education," *Journal of Dental Education*, vol. 65, no. 11, pp. 1225–1231, 2001.
- [24] I. Ioannou, L. Stern, E. Kazmierczak, A. C. Smith, and L. Z. Wise, "Towards defining dental drilling competence. Part 2: a study of cues and factors in bone drilling," *Journal of Dental Education*, vol. 74, no. 9, pp. 941–950, 2010.
- [25] I. Ioannou, E. Kazmierczak, L. Stern, A. C. Smith, L. Z. Wise, and B. Field, "Towards defining dental drilling competence. Part 1: a study of bone drilling technique," *Journal of Dental Education*, vol. 74, no. 9, pp. 931–940, 2010.
- [26] J. Abraham, D. M. Wade, K. A. O'Connell, S. Desharnais, and R. Jacoby, "The use of simulation training in teaching health care quality and safety: an annotated bibliography," *The American Journal of Medical Quality*, vol. 26, no. 3, pp. 229–238, 2011.
- [27] S. Haque and S. Srinivasan, "A meta-analysis of the training effectiveness of virtual reality surgical simulators," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58, 2006.
- [28] N. Mattheos, C. Ucer, T. van de Velde, and A. Nattestad, "Assessment of knowledge and competencies related to implant dentistry in undergraduate and postgraduate university education," *European Journal of Dental Education*, vol. 13, pp. 55–65, 2009.
- [29] R. M. Fanning and D. M. Gaba, "The role of debriefing in simulation-based learning," *Simulation in Healthcare*, vol. 2, no. 2, pp. 115–125, 2007.
- [30] W. C. McGaghie, S. B. Issenberg, E. R. Petrusa, and R. J. Scalese, "A critical review of simulation-based medical education research: 2003–2009," *Medical Education*, vol. 44, no. 1, pp. 50–63, 2010.
- [31] R. A. Cederberg, D. A. Bentley, R. Halpin, and J. A. Valenza, "Use of virtual patients in dental education: a survey of U.S. and Canadian dental schools," *Journal of Dental Education*, vol. 76, no. 10, pp. 1358–1364, 2012.
- [32] J. Morton, A. Cumming, and H. Cameron, "Performance-based assessment in undergraduate medical education," *Clinical Teacher*, vol. 4, no. 1, pp. 36–41, 2007.

II.2. Impact de la simulation haptique dans l'enseignement de la dentisterie restauratrice

II.2.1. Résumé de l'article : « Haptic simulation improve technical skills in restorative dentistry »

La principale habileté demandée à un chirurgien-dentiste est celle de savoir préparer et restaurer convenablement les dommages des tissus dentaires minéralisés résultant de lésions carieuses. Cette habileté s'acquiert progressivement par l'apprentissage approfondi des connaissances théoriques nécessaires à la compréhension des actes cliniques et par le développement d'une dextérité permettant leur correcte réalisation. Pour cela, les concepts de préparation cavitaire sont largement enseignés au sein des facultés de chirurgie dentaire. Cependant, l'application clinique de ces apprentissages théoriques doit passer par des pratiques cliniques répétées et encadrées. Pour de nombreuses raisons de financement, de matériel, de temps et d'effectif d'enseignants, la clinique hospitalière seule n'est pas un environnement idéal pour l'éducation aux soins dentaires⁶⁷.

L'objectif de notre étude prospective était de déterminer la contribution des simulateurs haptiques à simuler une préparation cavitaire, en tant qu'outil d'enseignement pour la formation des étudiants de première année en odontologie. Le but recherché est de fournir un environnement propice pour améliorer la formation préclinique des étudiants afin d'augmenter leur compétence et leur confiance avant leur premier acte clinique.

Résumé :

Introduction: évaluer l'utilisation d'un simulateur haptique comme outil d'enseignement pour simuler la préparation de la cavité de carie pour la formation des étudiants de première année en dentisterie.

Matériels et Méthode: Tous les étudiants en odontologie de première année (n = 88) de la Faculté de chirurgie dentaire de Nancy ont participé à cette expérimentation, répartis au hasard en deux groupes. Les étudiants du groupe 1 (n = 45) ont été affectés à préparations cavitaires sur un simulateur haptique (Virteasy®) et les étudiants du groupe 2 (n = 43) étaient affectés aux travaux pratiques conventionnels sur un modèle ivoire (Kavo®). Après trois

sessions de formation, les deux groupes ont ensuite effectué un examen final sur le même exercice sur le simulateur haptique.

Résultats: L'analyse des données objectives collectées a révélé une amélioration progressive de leurs compétences de forage, notamment en ce qui concerne les paramètres cruciaux tels que "Inside" et le ratio des paramètres "Inside / Outside" pour le groupe 1. Concernant les paramètres objectifs, le groupe formé par le simulateur (groupe 1) a surpassé le groupe formé sur ivoirine (groupe 2) lors des essais finaux avec des différences significatives pour le critère « outside » et le temps consacré à l'accomplissement des tâches.

Conclusion: Les méthodes d'apprentissage par simulateurs haptiques sont des options éducatives à pleinement considérer. Les paramètres subjectifs utilisés dans cette étude devraient être inclus dans les simulateurs pour améliorer l'auto-évaluation.

II.2.2. Article : « Haptic simulation improve technical skills in restorative dentistry »
soumis dans le BMC Medical education, (Co 1^{er} auteur) IF = 1.572

BMC Medical Education
Haptic Simulation Improves Technical Skills in Restorative Dentistry
--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	MEED-D-17-00314
Full Title:	Haptic Simulation Improves Technical Skills in Restorative Dentistry
Article Type:	Research article
Section/Category:	Approaches to teaching and learning
Funding Information:	
Abstract:	Abstract: Background: To evaluate the use of a haptic simulator for simulating cavity preparation as a valuable teaching tool for training of first-year students in dentistry Methods: All the first-year dental students (n = 88) of the Faculty of Dentistry of Nancy were enrolled and randomly defined: Students of Group 1 (n = 45) were assigned to cavity preparations on a haptic simulator (Virteasy®) and those in group 2 (n = 43) assigned to conventional practical work on an ivory model (Kavo®). Following three training sessions, both groups subsequently took a final exam on the same exercise on the haptic simulator. Results: The analysis of the objective data collected revealed a progressive improvement in their drilling skill especially concerning the crucial parameters such as "Inside" and the Ratio of "Inside/Outside" parameters for group 1. Concerning the objective parameters, the simulator-trained group (group 1) outperformed the ivory-trained group (group 2) during final testing with significant differences for the outside parameter and the time spent on task accomplishment. Conclusion: The learning methods of haptic simulators are educational options to be fully considered. The subjective parameters used in this study should be included in the simulators to improve self-evaluation.
Corresponding Author:	David JOSEPH Universite de Lorraine FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universite de Lorraine
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Marin VINCENT
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Marin VINCENT David JOSEPH Phi Linh NGUYEN-THI Christophe AMORY Nathalie PAOLI Pascal AMBROSINI Eric MORTIER Nguyen TRAN
Order of Authors Secondary Information:	
Opposed Reviewers:	

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

1 Haptic Simulation Improves Technical Skills in Restorative Dentistry

2 Marin VINCENT ^{1*}, David JOSEPH^{2,3,4*}, Phi Linh NGUYEN-THI⁵, Christophe AMORY¹,
3 Nathalie PAOLI², Pascal AMBROSINI², Éric MORTIER^{1**}, Nguyen TRAN^{3,4**}

4

5 ¹ Department of conservative dentistry, Faculty of Dentistry, University of Lorraine, 54000
6 Nancy, France

7 ² Department of periodontology, Faculty of Dentistry, University of Lorraine, 54000 Nancy,
8 France

9 ³ UMR-S1116, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

10 ⁴ School of Surgery Nancy-Lorraine, University of Lorraine, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy,
11 France

12 ⁵ Platform of Clinical Research Support PARC, CHRU Nancy, Nancy, F-54000, France.

13 *These authors contributed equally to this work

14 **These authors contributed equally to the direction of this work

15

16 Corresponding authors:

17 Dr David JOSEPH, School of Surgery Nancy-Lorraine, University of Lorraine, 54505
18 Vandoeuvre-les-Nancy, France
19 david.joseph@univ-lorraine.fr

20

21 E-mail co-authors :

22 marin.vincent@univ-lorraine.fr ; david.joseph@univ-lorraine.fr ; [pl.nguyen-thi@chru-](mailto:pl.nguyen-thi@chru-nancy.fr)
23 nancy.fr ; christophe.amory@univ-lorraine.fr ; nathalie.paoli@univ-lorraine.fr ;

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

24 pascal.ambrosini@univ-lorraine.fr ; eric.mortier@univ-lorraine.fr ; nguyen.tran@univ-lorraine.fr .

25 lorraine.fr .

26 **Abstract:**

27 **Background:** To evaluate the use of a haptic simulator for simulating cavity preparation as a
28 valuable teaching tool for training of first-year students in dentistry

29 **Methods:** All the first-year dental students (n = 88) of the Faculty of Dentistry of Nancy were
30 enrolled and randomly defined: Students of Group 1 (n = 45) were assigned to cavity
31 preparations on a haptic simulator (Virteasy®) and those in group 2 (n = 43) assigned to
32 conventional practical work on an ivory model (Kavo®). Following three training sessions,
33 both groups subsequently took a final exam on the same exercise on the haptic simulator.

34 **Results:** The analysis of the objective data collected revealed a progressive improvement in
35 their drilling skill especially concerning the crucial parameters such as “Inside” and the Ratio
36 of “Inside/Outside” parameters for group 1. Concerning the objective parameters, the simulator-
37 trained group (group 1) outperformed the ivory-trained group (group 2) during final testing with
38 significant differences for the outside parameter and the time spent on task accomplishment.

39 **Conclusion:** The learning methods of haptic simulators are educational options to be fully
40 considered. The subjective parameters used in this study should be included in the simulators
41 to improve self-evaluation.

42

43 **Keywords:** Haptic, Dental simulation, simulation, restorative dentistry, educational tool

44 Introduction

45 Restoring damage to mineralised tooth tissues resulting from caries is a prerequisite standard
46 of all dentists. Proficiency requires mastering the cavity preparation that is widely taught in
47 dental schools, through various training strategies that try to address an appropriate synergy
48 between the theoretical knowledge necessary for fully understanding clinical procedures and
49 best manual practices. However, for many reasons, there are still gaps in the number of
50 resources, the efficacy of the resources, training and acquisition [1] and there is also calls for
51 medico-surgical institutions to go beyond the minimum standard and adopt new approaches
52 that will meaningfully address modern and objective certification of proficiency [2–5].

53 Recently, virtual simulation or computer-assisted companionship has been suggested as an
54 efficient educational pathway to achieving a high level of practice and might be proved to be,
55 from now on, an important part of modern educational policy that helps healthcare professionals
56 to strengthen their graduation in keeping with their awareness of the safety of patients [6, 7].
57 Since its inception, simulation in dental education has shown better efficacy in teaching than
58 traditional techniques through more effective learning and systematic feedback [6]. The results
59 are particularly encouraging as they concern fields as varied as implantology [7, 8], oral surgery
60 [9], prosthetic [10], paediatric [11] and conservative dentistry [12]. However, further studies
61 are still needed in order to better assess the real contribution of simulation to dentistry.

62 In the particular case of cavity preparation, the use of Black's class II cavity, because of its
63 relative complexity in levels and forms, is often indicated to evaluate the skill of young students.
64 However, their proficiency is reported to be low and the learning curve can thus better be
65 gauged [13]. Our aim in this prospective study was to determine the contribution of a haptic
66 simulator for simulating cavity preparation as a valuable teaching tool for training of first-year
67 students in dentistry. Analysis was performed from comparative data extracted from simulators

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

68 and from the classical method *via* cavity preparation on ivory teeth. The study was conducted
69 with first-year students in dentistry in order to limit potential bias related to previous
70 experience.
71

72 **Materials and Methods**

73 **Population and General Study Design**

74 Research was conducted at the School of Surgery of Nancy-Lorraine (Lorraine University,
75 France) and the Faculty of Dentistry of Nancy (Lorraine University, France). All first-year
76 dental students (n = 88) of the Faculty of Dentistry of Nancy were enrolled and randomly
77 defined: Students of Group 1 (n = 45) were assigned to cavity preparations on a haptic simulator
78 (Virteasy®) and those in group 2 (n = 43) were assigned to conventional practical work on an
79 ivory model (Kavo®). Following three training sessions, both groups then sat a final exam on
80 the same exercise on the haptic simulator. Whatever the procedure (simulator or ivory model),
81 the maximum time for each cavity preparation was restricted to 10 minutes. There was an
82 interval of one week between sessions.

83 **The Simulator and Exercises**

84 The haptic simulator Virteasy® consists of a PC-type computer running Windows 7, a touch-
85 screen control for interacting with simulator software, a pair of 3D screen stereoscopic glasses
86 (Estar America® ESG6100) for viewing the 3D scene, a plastic contra-angled handpiece
87 connected to force feedback arm device (Geomagic® Touch™ X Haptic Device) to transcribe
88 the tactile sensations of drill in the bone, and a foot pedal to start the virtual handpiece in the
89 simulator.

90 No student had experienced virtual simulators before this study. Before the exercise, each
91 student had a short demonstration period on how to use the simulator *i.e.* the use of virtual
92 handpiece, the ergonomic positions and the feedback force provided by the machine. The
93 exercise on the haptic simulator was a Black's class II cavity on a first right mandibular molar
94 (#46) consisting in a principal cavity with a mesial opening and a depth of 4 mm, and in a

95 secondary cavity (prophylactic extension) with a depth of 2 mm (Figure 1). The second right
 96 mandibular premolar was left in place throughout the cavity preparation.
 97 After a briefing *via* PowerPoint presentation concerning the shape imperatives for a perfect
 98 cavity, the students of this group performed one cavity preparation per session. Four sessions
 99 were scheduled. Three first sessions were performed without assistance provided by the
 100 simulators (by means of colour targeting). The last session was done with computer assistance.
 101 All cavity preparation was achieved by means of an identical dental drill (Ref 830009, diameter:
 102 0.09 mm). After each exercise on the haptic simulator, each student underwent a 10-min
 103 debriefing period, and areas of improvement were clearly explained and recalled before new
 104 sessions.
 105 In the last (4th) session, for the final exam, each group performed a simulator preparation with
 106 computer assistance.
 107 In addition, group 1 also performed a cavity preparation on an ivory model.
 108
 109 **The Ivory Model and Exercises**
 110 All students had experimented with ivory models for 5 months before the study. However, they
 111 did not have experience with Black's class II cavity. The exercise on an ivory model was the
 112 same as that on the haptic simulator. All students benefitted from the same briefing procedure
 113 with a PowerPoint presentation displaying required operations and expected results.
 114 Four sessions were also scheduled. The first three sessions were performed on an ivory model.
 115 The dental drills were references 830008, 830010 (diameter: 0.08 and 0.1 mm). After each
 116 exercise, each student had an individual 10-min debriefing session, and areas of improvement
 117 were clearly explained and recalled before new sessions.

118

1
2
3 119 **Parameters studied**
4
5
6 120 *Objective parameters recorded from the simulator*
7
8
9 121 For each test, different objective parameters provided by the simulator were recorded
10
11
12 122 and displayed in an Excel spreadsheet:
13
14 123 (i) percentage of tissue removed corresponding to the required target (between 0
15
16 and 100%), noted “inside”,
17 124
18
19 125 (ii) percentage of tissue removed outside the requested target, noted “outside”,
20
21
22 126 (iii) ratio, calculated as “100 – (inside + outside)”,
23
24 127 (iv) drilling time (time in seconds during which the drill bit is rotated during the
25
26 exercise).
27 128
28
29
30 129 *Subjective parameters recorded from both groups*
31
32
33 130 For each test and in both groups, different subjective parameters were evaluated in a
34
35
36 131 double-blind manner and recorded in an Excel spreadsheet:
37
38
39 132 (i) outline shape of the cavity:
40
41 133 -2: very bad (no outline shape),
42
43 -1: bad (outline shape slightly pronounced),
44 134
45 0: passable (visible but irregular outline shape),
46 135
47
48 136 1: good (outline shape globally respected),
49
50 2: very good (outline shape perfectly respected).
51 137
52
53 138
54
55 139 (ii) respect of depth (2 mm) within the principal and secondary cavities :
56
57
58 140 -1: no difference (depth = 0),
59
60
61
62
63
64
65

- 141 0: depth partially respected (depth <2 mm),
 142 1: perfectly depth difference (depth = 2 mm).
 143
 144 (iii) regularity of the cavity floor :
 145 -2: over 3 irregularities or presence of a perforation,
 146 -1: 3 irregularities < 1 mm or presence of 1 irregularities > 1 mm,
 147 0: 2 irregularities,
 148 1: 1 irregularity,
 149 2: 0 irregularity.
 150
 151 (iv) presence of iatrogenic milling (milling stroke) on the molar (#46):
 152 -1: presence of iatrogenic milling on the molar,
 153 1: absence of iatrogenic milling on the molar.
 154
 155 (v) presence of distal iatrogenic milling (milling stroke) on the premolar (#45):
 156 -1: premolar impacted with cavity damage,
 157 0: premolar impacted without cavity damage,
 158 1: premolar no impacted.

159 **Statistical Analysis**

160 The results were expressed as mean $\pm$ standard deviation from the mean ($m \pm SD$). Data were
 161 analyzed using non-parametric Friedman statistical tests with Dunn's correction at $\alpha = 0.05$ for
 162 multiple paired comparison, and non-parametric Mann-Whitney U tests for two-by-two
 163 comparison. Probability $P < 0.05$ was considered significant. Analyses were made possible
 164 through the GraphPad® Prism software (GraphPad Software San Diego, CA, USA).

166 Results

167 Objective parameter analysis during the training period

168 The outcomes of group 1 are highlighted in Figure 2. The analysis of the objective data collected
169 revealed progressive improvement in their drilling skill, especially concerning the crucial
170 parameters such as “Inside” and the Ratio of “Inside/Outside” parameters. Training with
171 simulators allowed young novices to gain a significant score of “Inside” parameters after
172 attempting 4 exercises (score of E1 = $68 \pm 11\%$ versus E4 = 92 ± 7 ; $p < 0.0001$). Similarly, the
173 ratio of “Inside/Outside” was $35 \pm 11\%$ in Exercise 1 and $9.3 \pm 6.1\%$ in Exercise 4 ($p < 0.0001$),
174 corresponding to a 73% improvement during the training period. No significant difference was
175 noted regarding the “outside” parameter between the four exercises, but we can note a decrease
176 in variability of SD, however.

177 The time spent to perform drilling was 217 ± 107 sec during the first exercise decreasing
178 significantly to 192 ± 66 sec ($p = 0.0001$) during phase 4 of training. Likewise, the total time of
179 operation performed by novices using simulators was significantly lower in Exercise 4
180 compared to the first one, values being 389 ± 118 seconds at E4 versus 527 ± 102 seconds at E1
181 ($p < 0.0001$). When considering the novices using the ivory model (group 2), we also observed
182 an improvement in the sole objective parameter available here *i.e.* the total drilling time. Their
183 learning curve is shown in Figure 2f. Based on 3 exercises, the average time spent managing
184 the ivory model was 543 ± 73 in E1, 444 ± 97 in E2 and 424 ± 105 in E3 corresponding to an
185 optimization of 22% in terms of time gained. We also noted that, irrespective of the model
186 (computerized or physical ivory), the time spent to perform cavity preparation was similar.

187 Subjective parameters analysis during the training period

Figure 3 displays the subjective gain in experience stemming from outcomes of novices working with the computerized cavity model. For “outline shape of the cavity”, a clear progressive improvement over time was observed. The difference in scores was reported to be $-0,81 \pm 1,0$ at E1 at 0.71 ± 0.9 at E4 corresponding to an improvement of 187% ($p < 0.0001$). With regard to the “respect of the depth” evaluation, we were able to detect a significant gradual rising trend in the magnitude of drilling approaching 160% after the 4th exercise. We can also note an improvement of the “iatrogenic milling on 46” and “regularity of the cavity floor” parameters highlighted by a decrease in SD. Regarding the “iatrogenic milling on 45”, the outcome of E4 was significantly worse than E1 and E2 ($P < 0.05$ for both). In this particular case, it seemed to indicate that novices, while trying to ameliorate their gestures in the proximal part of the cavity, had a tendency to come into contact with the number 45 tooth.

Figure 4 illustrates the subjective criteria obtained in group 2. Novices who had worked with the ivory preparation have also shown a significant gain in skills in terms of “outline shape of the cavity” (values being of -0.5 ± 0.9 at E1 and of -0.025 ± 1.0 at the 3rd session; $p < 0.001$) and of “respect of the depth” (values being of -0.10 ± 0.4 at E1 and of 0.3 ± 0.6 at the 3rd session; $p < 0.001$).

Comparison of the two groups in the same training exercise

We subsequently tried to test the proficiency of novices following their different methods of training. We first evaluated them on simulators (Figure 5). Concerning the objective parameters, the simulator-trained group (group 1) outperformed the ivory-trained group (group 2) during cavity preparation with significant differences for the outside parameter and the time spent for task accomplishment (Figure 5). The average of “outside” was $2.9 \pm 0.8\%$ in Group 1 versus $4.2 \pm 2.2\%$ in Group 2 ($p < 0.001$). The mean drilling time was shorter in simulator-trained students than in their ivory-trained counterparts, values being 192 ± 65 sec versus 288 ± 105 sec

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

212 respectively ($p<0.0001$). Similarly, the mean total time was documented to be reduced in group
213 1 (389 ± 118 sec) compared to group 2 (515 ± 88 sec) ($p<0.001$). When considering subjective
214 parameters (Figure 6), no significant difference was found between the two groups except for
215 “iatrogenic milling on 46” where we documented that the students from group 1 made less
216 damage ($p<0.05$).

217 When we tried to compare the two groups on an ivory preparation, the outcomes of all
218 parameters were reported (Figure 7), no significant difference was found between the two
219 groups.

221 Discussion

222 The current paradigm of surgical training in general and particularly in dentistry continues to
223 raise concerns about the appropriate evaluation of a student's proficiency since subjective
224 criteria still play a fundamental role in judgement. Very recently, virtual reality in education or
225 the concept of "computer-assisted companionship" in the field of medico-surgical training has
226 been proven to be an efficient pedagogical adjunct to better shape the learning process and
227 learning outcomes. Simulators with force feedback haptic arms have been successfully tested
228 in many dental and medical fields [14–21]. The purpose of this study was to attempt to highlight
229 the potential impact of haptic simulators in restorative dentistry for training first-year dental
230 students. In comparing this innovative learning method of cavity preparation with the classical
231 technique on ivory teeth, several key messages might be extracted from this prospective study.
232 First, the haptic simulator has enabled, according to available objective parameters, to monitor
233 the progression of novices concerning cavity preparation on a Black's class II cavity. Second,
234 there was no significant difference between the two methods of learning according to the
235 subjective indicators used herein.

236 We conducted this study with first-year dental students in order to limit potential bias related
237 to previous experience. We used a Black's class II cavity to test the progression in dexterity of
238 young students in cavity preparation. This model provides a good base for the development of
239 fine motor skills such as the respect of shape and depth of the cavity, the regularity of the cavity
240 floor and the absence of iatrogenic milling. Likewise, without well-integrated psychomotor
241 skills such as timing, sequencing, speed and precision of hand-eye coordination, and
242 mechanical ability, proficiency in cavity preparation becomes quite challenging and indeed
243 some authors have called for a better certification of this procedure [22, 23].

244 As largely admitted [24–27], a major factor driving an efficient learning curve is likely to be
245 the reliance on correlation in duration of procedure and in performance of gestures, which is a

246 fundamental component of efficiency [7, 28, 29]. Our findings clearly confirm that the two
 247 methods of cavity preparation (virtual or physical) led to improvement in dexterity with similar
 248 beneficial impact on the learning curves. Indeed, the time spent performing the exercises
 249 diminished significantly with training in both groups. Regarding group 1, the time for exercise
 250 completion was significantly reduced, going from an average of 216 sec in the first exercise to
 251 149 sec in the 3rd one, representing therefore an improvement of about 30%. To further evaluate
 252 their precision in achieving a virtual cavity, we used the additional parameter “ratio 100 – (%
 253 inside + % outside)” to better define the student’s improvement than the “% inside” and “%
 254 outside” criteria alone. Indeed, a student with a “% inside” of 95% could be considered as good
 255 while outcome of “% outside” was over 10%. This ratio allowed us to eliminate this statistical
 256 bias by considering the complete performance of each student. Taken together, we have clearly
 257 documented a concomitant improvement in ability as witnessed by the result obtained from the
 258 ratio between the percentages of “inside” and “outside” of students in this group displaying a
 259 significant learning curve during the training phase.

260 In keeping with data observed in group 1, reduction in timing was also seen in the group of
 261 young novices undergoing learning on the ivory materials; improvement being 22% after 3
 262 sessions going from 543 ± 73 to 424 ± 105 sec. Thus, it was also associated with a significant
 263 improvement in outline shape of the cavity, in respect of the principal and secondary cavity
 264 depths, in iatrogenic milling and in regularity of the cavity floor. It could thus be argued that
 265 the combination of repetition and debriefings during the phase of acquisition during the
 266 procedure is crucial to reach the expected pedagogical end-point. Our data outlined therefore,
 267 as already claimed elsewhere [30], the imperative need for companionship through a close
 268 briefing-debriefing/feedback concept in the learning cycle. It should be noted here that the
 269 timing to prepare a virtual cavity was very similar when compared to the time spent for ivory
 270 achievement. However, simulator-based students had performed cavity preparation with less

1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50
 51
 52
 53
 54
 55
 56
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65

271 iatrogenic damage. We hypothesize that this outcome might be attributable to the enhanced
 272 computerized visual system therefore favoring the hand-eye coordination of the novice. We and
 273 others have previously examined the feasibility and benefits of 3D simulators on task-oriented
 274 approaches in several new surgical techniques such as robotic surgery [31, 32] or implantology
 275 [7, 8] Magnification of details contributes to help to strengthen the cognitive acquisition of the
 276 task and to improve the confidence of the novice. In keeping with this observation, we have
 277 also demonstrated that young residents who have former experiences in microsurgery (3D
 278 visualization and coordination) can significantly improve their abilities and their performance
 279 in robotic training [33, 34]. The fact that students in group 1 took the same time as those in
 280 group 2 when they first faced an ivory model (without the possibility of enhancing the target)
 281 clearly illustrates this observation (Fig 7f). Based on this evidence, we suggest that the use of a
 282 dedicated microscope, in cavity preparation training, might be an effective tool to contribute to
 283 enhancing the outcome.

284 Interestingly, new findings have emerged when we tried to inverse the two groups during the
 285 final test. This exam consisted, for both groups, in achieving (1) ivory preparation and (2)
 286 realizing a virtual cavity. In the latter case, because former experience with computerized
 287 simulators might represent an equivocal advantage, exercises were then performed with a
 288 virtual computer companionship offering all students a similar guide during evaluation
 289 conditions. In the final ivory test, results from the two groups were similar, thereby suggesting
 290 that earlier training on a virtual cavity by students in group 1 was effective at improving their
 291 gesture when experiencing a physical model for the first time. By contrast, when the two groups
 292 performed the virtual cavity, some differences could be noticed. Among objective criteria, the
 293 “% outside” and “drilling time” parameters were found to be significantly better in favour of
 294 students from group 1 ($p = 0.0045$ and $p < 0.0001$, respectively). Regarding subjective criteria,
 295 there were no differences except the “iatrogenic milling on 46” in favour of group 1. Although

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

296 these results can be explained by the gain in experience with the simulator from students in
297 group 1, our data from the final ivory test pointed to the usefulness of the simulator in the
298 acquisition of surgical skills. Virtual reality-based training significantly improved the surgical
299 ability and psychomotricity skills of learners [35]. Simulators with force feedback haptic arms
300 have been successfully tested in many dental and medical fields [14–21]. Our results are in
301 agreement with the literature and demonstrate that these new virtual reality training
302 technologies could be used in preclinical training for dental students, allowing them to enhance
303 their learning curve [36]. In this study, we further outlined the importance of mentoring through
304 correct briefing/debriefing procedure. In the contemporary context where our educational
305 mission is somehow hampered by the inadequacy of the student / teacher ratio, it becomes more
306 and more difficult to maintain an appropriate level of interaction between learners and tutors.
307 The objective of the implementation of this new technology would be therefore to complete the
308 training of dental preclinical student [1]. The literature supports this aim and shows a real
309 benefit in terms of time, individualized training and material and human resources [37–39].
310 Thus, students can be trained more quickly with systematic feedback; their progress curves are
311 accelerated. In addition, self-service concepts could allow students to be able to train outside of
312 their preclinical hours, without the mandatory presence of teachers. In this framework, and for
313 all the reasons outlined in this study, the learning methods of haptic simulators are educational
314 options which should be fully considered [40].

315 **Conclusions**

316 Our study highlighted the complementarity of the traditional and virtual method in the training
317 of dental students. Objective certification of basic gestures in odontology thanks to these new
318 devices should gradually become essential in initial training and then in continuing education.
319 In order to be fully usable, the development and implementation of new objective evaluation

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

320 criteria, for example such as the criteria used in this study, could be a solution to be considered

321 to improve student self-assessment.

322

323 **List of Abbreviations :**

324 **Sec** = seconds

325

326 **Declarations :**

327 **Acknowledgements**

328 This work was carried out thanks to the support of the European Fundings for Regional

329 Development (Fonds Européens de Développement Régional, FEDER) within the framework

330 of the project Virtual hospital of Lorraine.

331 **Funding**

332 Part of the study has received a funding from the the European Fundings for Regional

333 Development (Fonds Européens de Développement Régional, FEDER)

334 **Availability of data and materials**

335 The data are kept at the School of surgery Nancy-Lorraine (Nancy, FRANCE). Any questions

336 or requests regarding the data can be addressed to Dr David JOSEPH (david.joseph@univ-

337 lorraine.fr)

338 **Authors' contributions**

339 Dr Marin VINCENT and Dr David JOSEPH contributed to conception and design, acquisition

340 of data, and analysis of data. Dr Eric MORTIER and Dr Nguyen TRAN contributed to

341 conception, design and interpretation of data. Dr David JOSEPH Dr Eric MORTIER and Dr

342 Nguyen TRAN wrote the paper.

343 **Competing interests**

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

344 The authors declare that they have no competing interests.

345 **Consent for publication**

346 All authors have read and approved the final version of the manuscript.

347 **Ethics approval and consent to participate**

348 All participants received consent form and gave their agreement.

349

350 **References**

- 351 1. V.R. LeBlanc, A. Urbankova, F. Hadavi, and R.M. Lichtenthal: "A preliminary study in
352 using virtual reality to train dental students." *J Dent Educ.* vol. 68, no. 3, pp. 378–383,
353 2004.
- 354 2. C.R. Kaufmann: "Computers in surgical education and the operating room." *Ann Chir*
355 *Gynaecol.* vol. 90, no. 2, pp. 141–146, 2001.
- 356 3. K.R. Wanzel, M. Ward, and R.K. Reznick: "Teaching the surgical craft: From selection to
357 certification." *Curr Probl Surg.* vol. 39, no. 6, pp. 573–659, 2002.
- 358 4. Y. Okuda, E.O. Bryson, S. DeMaria Jr, L. Jacobson, J. Quinones, B. Shen, and A.I. Levine:
359 "The utility of simulation in medical education: what is the evidence?" *Mt. Sinai J. Med.*
360 vol. 76, no. 4, pp. 330–343, 2009.
- 361 5. F.F. Bilotta, S.M. Werner, S.D. Bergese, and G. Rosa: "Impact and Implementation of
362 Simulation-Based Training for Safety." *ScientificWorldJournal.* vol. 2013, pp. 652956,
363 2013.
- 364 6. S. Perry, S.M. Bridges, and M.F. Burrow: "A review of the use of simulation in dental
365 education." *Simul Healthc.* vol. 10, no. 1, pp. 31–37, 2015.
- 366 7. D. Joseph, J.-P. Jehl, P. Maureira, C. Perrenot, N. Miller, P. Bravetti, P. Ambrosini, and N.
367 Tran: "Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in
368 Implantology." *BioMed Research International.* vol. 2014, pp. e413951, 2014.
- 369 8. H. Kinoshita, M. Nagahata, N. Takano, S. Takemoto, S. Matsunaga, S. Abe, M. Yoshinari,
370 and E. Kawada: "Development of a Drilling Simulator for Dental Implant Surgery." *J Dent*
371 *Educ.* vol. 80, no. 1, pp. 83–90, 2016.
- 372 9. P. Pohlenz, A. Gröbe, A. Petersik, N. von Sternberg, B. Pflesser, A. Pommert, K.-H. Höhne,
373 U. Tiede, I. Springer, and M. Heiland: "Virtual dental surgery as a new educational tool in
374 dental school." *J Craniomaxillofac Surg.* vol. 38, no. 8, pp. 560–564, 2010.

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- 375 10. H. Kikuchi, M. Ikeda, and K. Araki: "Evaluation of a virtual reality simulation system for
376 porcelain fused to metal crown preparation at Tokyo Medical and Dental University." *J*
377 *Dent Educ.* vol. 77, no. 6, pp. 782–792, 2013.
- 378 11. L. Papadopoulos, A.-E. Pentzou, K. Louloudiadis, and T.-K. Tsiatsos: "Design and
379 Evaluation of a Simulation for Pediatric Dentistry in Virtual Worlds." *J Med Internet Res.*
380 vol. 15, no. 10, 2013.
- 381 12. E.J. Eve, S. Koo, A.A. Alshihri, J. Cormier, M. Kozhenikov, R.B. Donoff, and N.Y.
382 Karimbux: "Performance of Dental Students Versus Prosthodontics Residents on a 3D
383 Immersive Haptic Simulator." *J Dent Educ.* vol. 78, no. 4, pp. 630–637, 2014.
- 384 13. H. Zou, S. Jin, J. Sun, and Y. Dai: "Cavity preparation skill evaluation system for assessing
385 junior dental students." *Med Educ.* vol. 50, no. 5, pp. 586–587, 2016.
- 386 14. A.G. Gallagher, A.B. Lederman, K. McGlade, R.M. Satava, and C.D. Smith:
387 "Discriminative validity of the Minimally Invasive Surgical Trainer in Virtual Reality
388 (MIST-VR) using criteria levels based on expert performance." *Surg Endosc.* vol. 18, no.
389 4, pp. 660–665, 2004.
- 390 15. A.G. Gallagher, K. Richie, N. McClure, and J. McGuigan: "Objective psychomotor skills
391 assessment of experienced, junior, and novice laparoscopists with virtual reality." *World J*
392 *Surg.* vol. 25, no. 11, pp. 1478–1483, 2001.
- 393 16. K. Gallagher, J. Stephenson, R. Brown, C. Holmes, and P. Ballester: "Exploiting 3D Spatial
394 Sampling in Inverse Modeling of Thermochronological Data." *Reviews in Mineralogy and*
395 *Geochemistry.* vol. 58, no. 1, pp. 375–387, 2005.
- 396 17. E.R. Wierinck, V. Puttemans, S.P. Swinnen, and D. van Steenberghe: "Expert Performance
397 on a Virtual Reality Simulation System." *J Dent Educ.* vol. 71, no. 6, pp. 759–766, 2007.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

398 18. E. Wierinck, V. Puttemans, S. Swinnen, and D. van Steenberghe: "Effect of augmented
399 visual feedback from a virtual reality simulation system on manual dexterity training." *Eur*
400 *J Dent Educ.* vol. 9, no. 1, pp. 10–16, 2005.

401 19. O.A.J. van der Meijden and M.P. Schijven: "The value of haptic feedback in conventional
402 and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review."
403 *Surg Endosc.* vol. 23, no. 6, pp. 1180–1190, 2009.

404 20. F. Quinn, P. Keogh, A. McDonald, and D. Hussey: "A study comparing the effectiveness
405 of conventional training and virtual reality simulation in the skills acquisition of junior
406 dental students." *Eur J Dent Educ.* vol. 7, no. 4, pp. 164–169, 2003.

407 21. K. Moorthy, Y. Munz, S.K. Sarker, and A. Darzi: "Objective assessment of technical skills
408 in surgery." *BMJ.* vol. 327, no. 7422, pp. 1032–1037, 2003.

409 22. L.M. Al-Saud, F. Mushtaq, M.J. Allsop, P.C. Culmer, I. Mirghani, E. Yates, A. Keeling,
410 M.A. Mon-Williams, and M. Manogue: "Feedback and motor skill acquisition using a
411 haptic dental simulator." *Eur J Dent Educ.* pp. n/a-n/a, 2016.

412 23. I. Mirghani, F. Mushtaq, M.J. Allsop, L.M. Al-Saud, N. Tickhill, C. Potter, A. Keeling,
413 M.A. Mon-Williams, and M. Manogue: "Capturing differences in dental training using a
414 virtual reality simulator." *Eur J Dent Educ.* pp. n/a-n/a, 2016.

415 24. I. Ioannou, E. Kazmierczak, L. Stern, A.C. Smith, L.Z. Wise, and B. Field: "Towards
416 defining dental drilling competence, part 1: a study of bone drilling technique." *J Dent*
417 *Educ.* vol. 74, no. 9, pp. 931–940, 2010.

418 25. F. Mohtashami, P. von Dadelszen, and C. Allaire: "A surgical virtual reality simulator
419 distinguishes between expert gynecologic laparoscopic surgeons and perinatologists."
420 *JSLS.* vol. 15, no. 3, pp. 365–372, 2011.

421 26. S.H. Mandava, J. Liu, M.M. Maddox, B. Woodson, R. Thomas, and B.R. Lee:
422 "Stratification of Expert vs Novice Laparoscopists Using the Basic Laparoscopic Urologic

- 423 Surgery (BLUS) Curriculum at a Single Institution.” *J Surg Educ.* vol. 72, no. 5, pp. 964–
1 968, 2015.
2 424
3
- 4 425 27. P.A. Kenney, M.F. Wszolek, J.J. Gould, J.A. Libertino, and A. Moinzadeh: “Face, Content,
5 and Construct Validity of dV-Trainer, a Novel Virtual Reality Simulator for Robotic
6
7 426
8
9 427 Surgery.” *Urology.* vol. 73, no. 6, pp. 1288–1292, 2009.
- 10
11 428 28. I. Ioannou, L. Stern, E. Kazmierczak, A.C. Smith, and L.Z. Wise: “Towards defining dental
12 drilling competence, part 2: a study of cues and factors in bone drilling.” *J Dent Educ.* vol.
13
14 429
15 74, no. 9, pp. 941–950, 2010.
16 430
- 17 431 29. J. Morton, A. Cumming, and H. Cameron: “Performance-based assessment in
18 undergraduate medical education.” *The Clinical Teacher.* vol. 4, no. 1, pp. 36–41, 2007.
19 432
- 20 433 30. R.M. Fanning and D.M. Gaba: “The role of debriefing in simulation-based learning.” *Simul*
21
22 434
23 *Healthc.* vol. 2, no. 2, pp. 115–125, 2007.
- 24 435 31. M. Perez, C. Perrenot, N. Tran, G. Hossu, J. Felblinger, and J. Hubert: “Prior experience in
25 micro-surgery may improve the surgeon’s performance in robotic surgical training.” *Int J*
26
27 436
28
29 437
30 *Med Robot.* vol. 9, no. 3, pp. 351–358, 2013.
- 31 438 32. C. Perrenot, M. Perez, N. Tran, J.-P. Jehl, J. Felblinger, L. Bresler, and J. Hubert: “The
32 virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills.”
33
34 439
35
36 440
37 *Surg Endosc.* vol. 26, no. 9, pp. 2587–2593, 2012.
- 38 441 33. S.B. Bhayani and G.L. Andriole: “Three-Dimensional (3D) Vision: Does It Improve
39 Laparoscopic Skills? An Assessment of a 3D Head-Mounted Visualization System.” *Rev*
40
41 442
42
43 443
44
45
46 444
47
48 445
49
50 446
51
52
53 447
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

448 35. P. Piromchai, A. Avery, M. Laopaiboon, G. Kennedy, and S. O’Leary: “Virtual reality
1 training for improving the skills needed for performing surgery of the ear, nose or throat.”
2 449
3
4 450 *Cochrane Database Syst Rev.* no. 9, pp. CD010198, 2015.
5
6
7 451 36. J.A. Buchanan: “Use of simulation technology in dental education.” *J Dent Educ.* vol. 65,
8
9 452 no. 11, pp. 1225–1231, 2001.
10
11
12 453 37. M.D. Miller: “Office procedures. Education, training, and proficiency of procedural skills.”
13
14 454 *Prim. Care.* vol. 24, no. 2, pp. 231–240, 1997.
15
16
17 455 38. A.M. Derossis, G.M. Fried, M. Abrahamowicz, H.H. Sigman, J.S. Barkun, and J.L.
18
19 456 Meakins: “Development of a model for training and evaluation of laparoscopic skills.” *Am.*
20
21 457 *J. Surg.* vol. 175, no. 6, pp. 482–487, 1998.
22
23
24 458 39. A.S. Kalsi, H. Higham, M. McKnight, and D.K. Dhariwal: “Simulation training for dental
25
26 459 foundation in oral and maxillofacial surgery - a new benchmark.” *Br Dent J.* vol. 215, no.
27
28 460 11, pp. 571–576, 2013.
29
30
31 461 40. W.C. McGaghie, S.B. Issenberg, E.R. Petrusa, and R.J. Scalese: “A critical review of
32
33 462 simulation-based medical education research: 2003-2009.” *Med Educ.* vol. 44, no. 1, pp.
34
35 463 50–63, 2010.
36
37
38 464
39
40
41
42 465
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Figure 1:

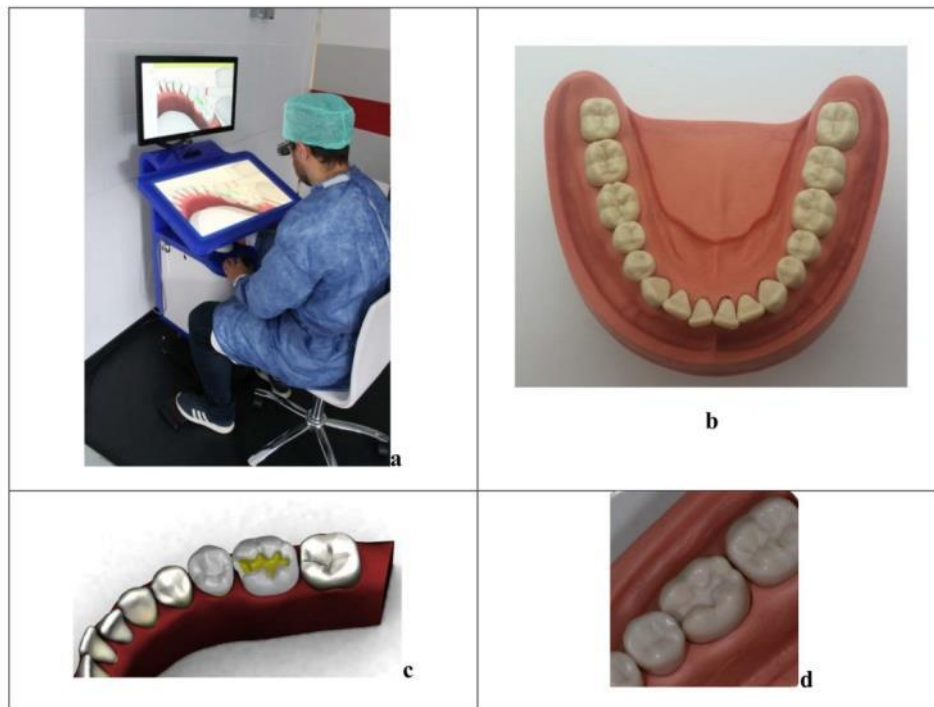


Figure 2

[Click here to download Figure Figure 2.docx](#)

Figure 2:

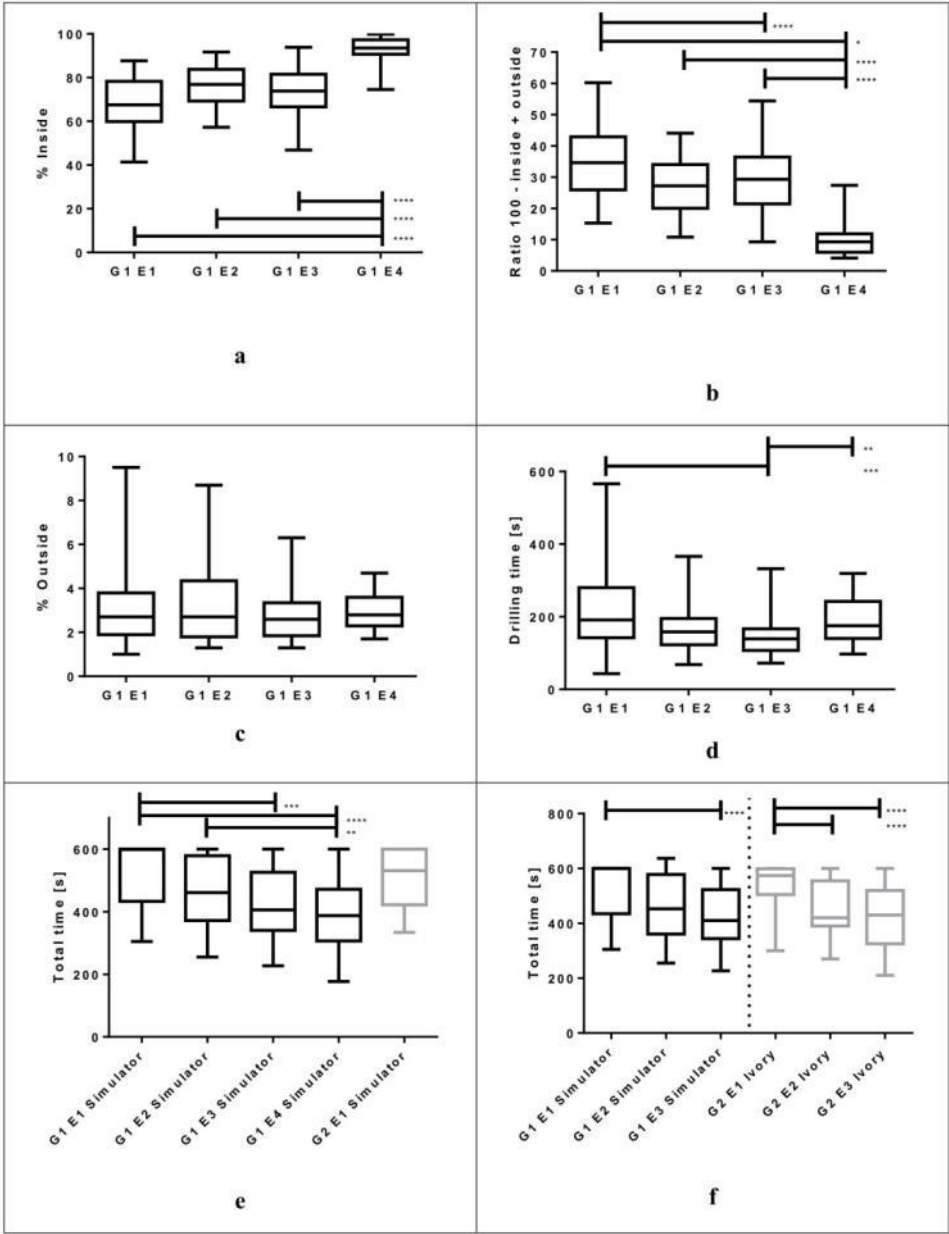


Figure 3

[Click here to download Figure Figure 3.docx](#)

Figure 3:

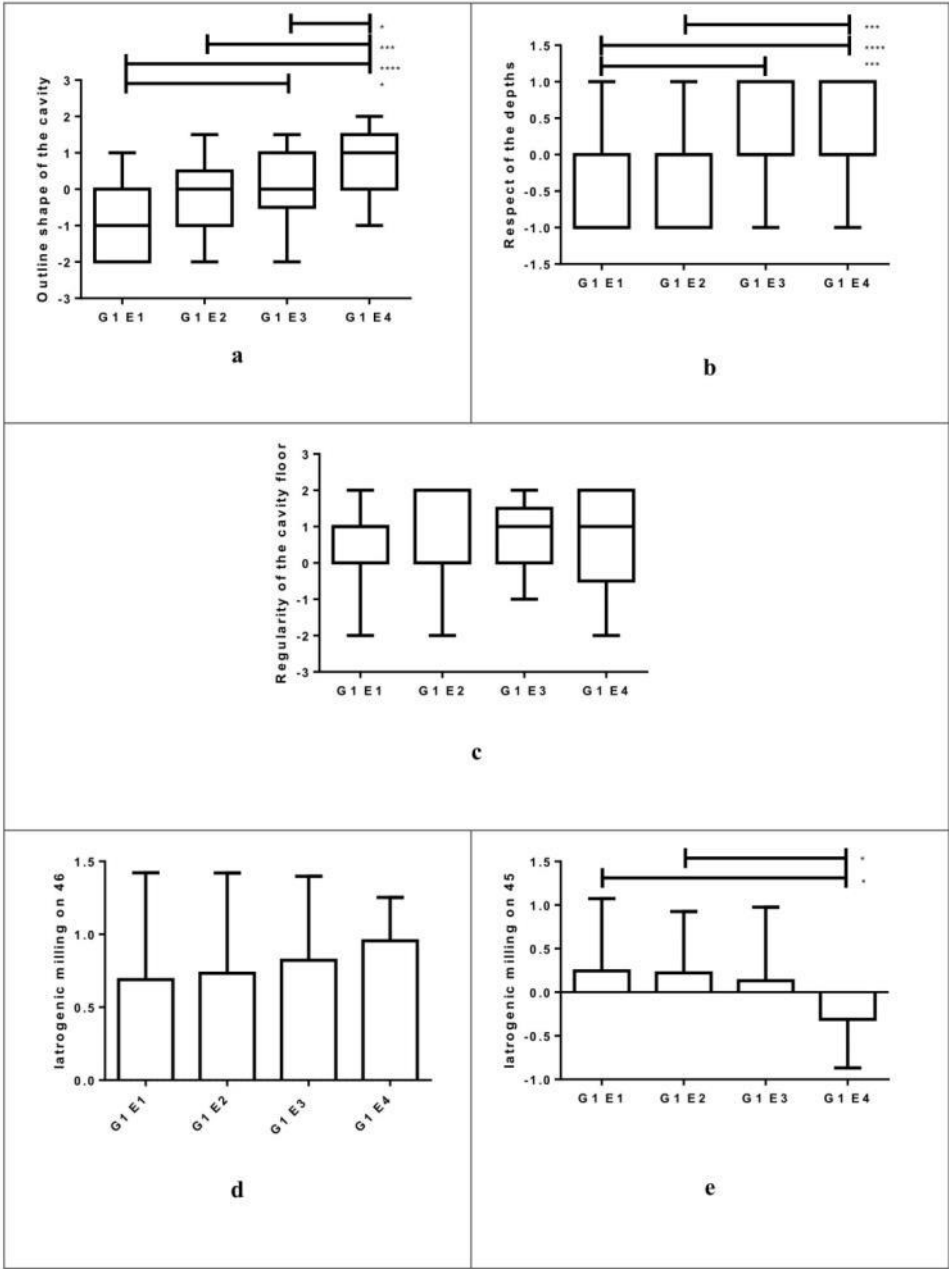


Figure 4

[Click here to download Figure Figure 4.docx](#)

Figure 4:

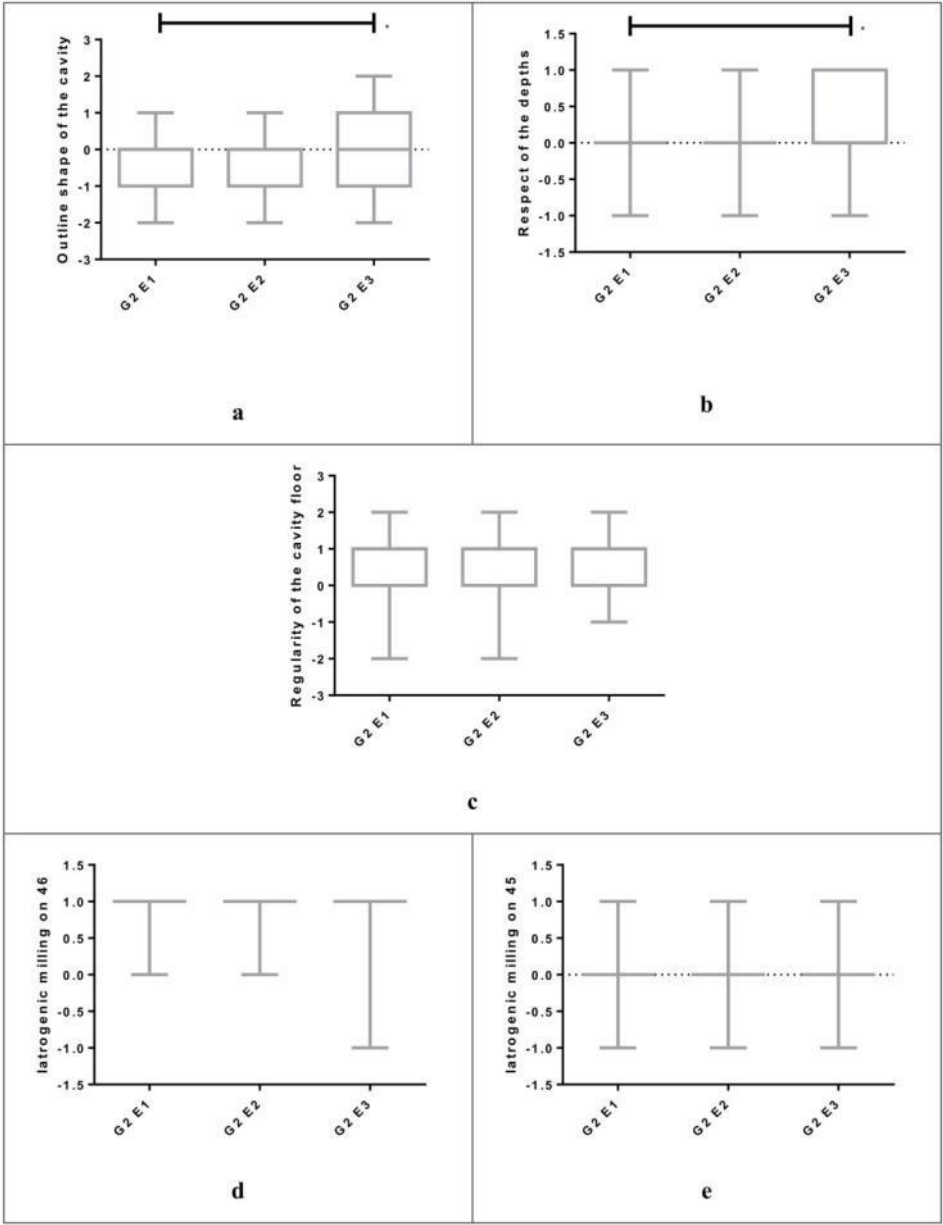


Figure 5

[Click here to download Figure Figure 5.docx](#)

Figure 5:

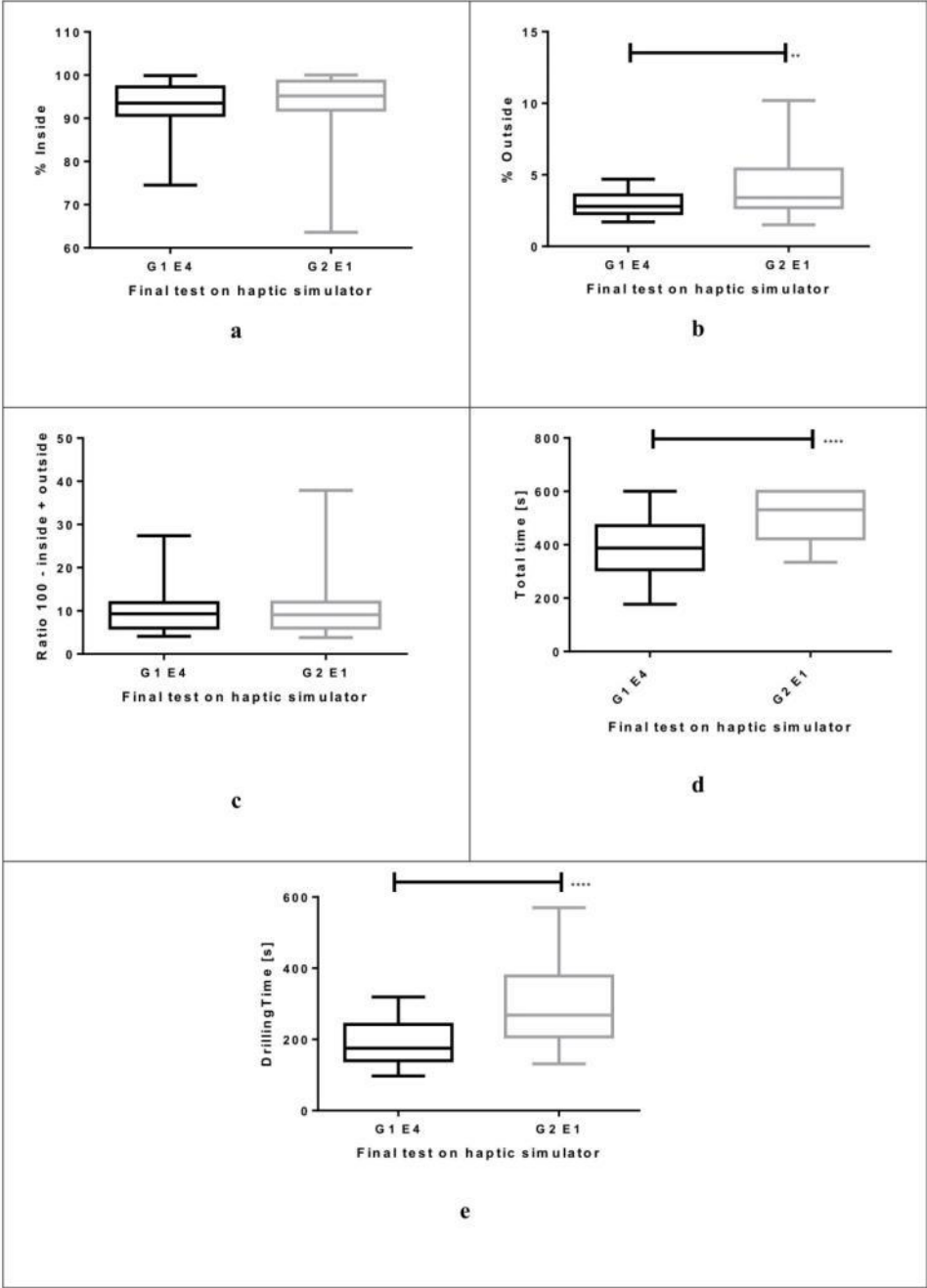


Figure 6:

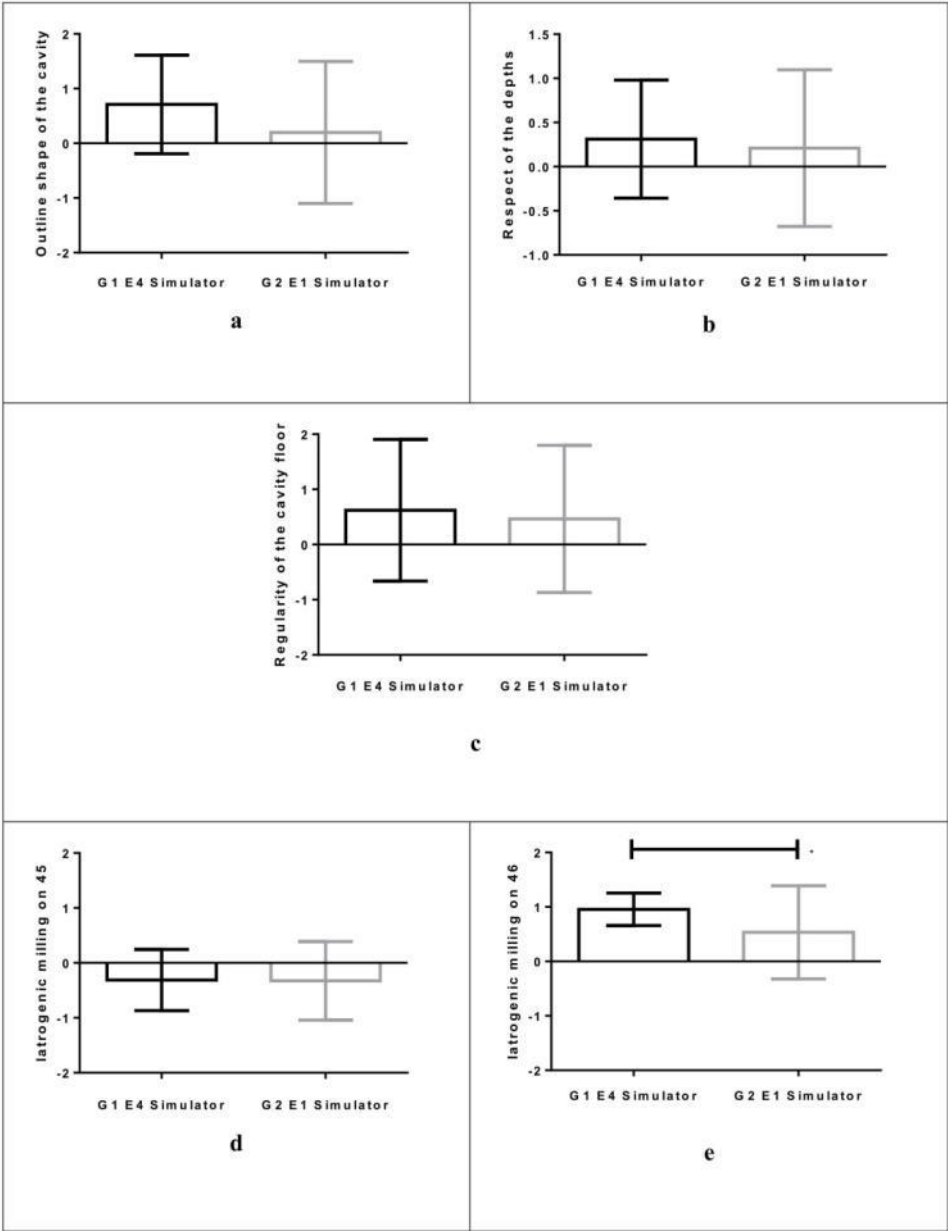
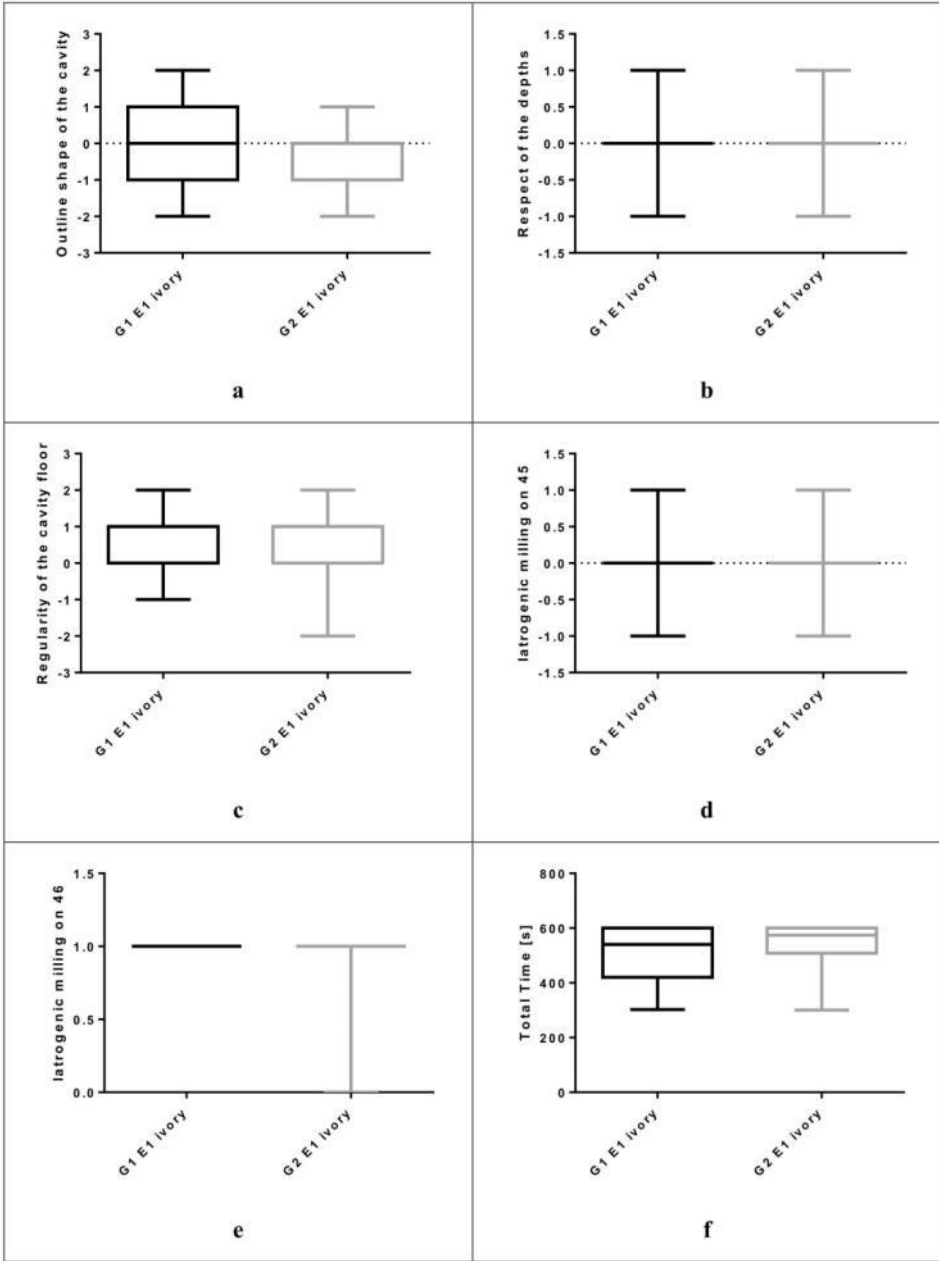


Figure 7:



List of figures

Figure 1: Simulator **1a:** Virteasy® and **1b:** ivory model. **1c:** Master preparation on simulator and **1d:** ivory model

Figure 2: Evolution of objective parameters on haptic simulation (group 1) **2a:** % inside, **2b:** % outside, **2c:** Ratio, **2d:** Drilling Time **2e:** Total time and evolution of time on ivory model (group 2). **2e:** Total Time. (*= $p<0.05$, **= $p<0.01$ ***/****= $p<0.0001$)

Figure 3: Evolution of subjective parameters on haptic simulation. **3a:** Outline shape of the cavity **3b:** Respect of the depths, **3c:** Regularity of the cavity floor, **3d:** Iatrogenic milling on 45, **3e:** Iatrogenic milling on 46. (*= $p<0.05$, **= $p<0.01$ ***/****= $p<0.0001$)

Figure 4: Evolution of subjective parameters on Ivory simulation. **4a:** Outline shape of the cavity **4b:** Respect of the depths, **4c:** Regularity of the cavity floor, **4d:** Iatrogenic milling on 46, **4e:** Iatrogenic milling on 45. (*= $p<0.05$)

Figure 5: Final exam: comparison of objective parameters on haptic simulation. **5a:** % inside, **5b:** % outside, **5c:** Ratio, **5d:** Total Time **5e:** Drilling time. (*= $p<0.05$, **= $p<0.01$ ***/****= $p<0.0001$)

Figure 6: Final exam: comparison of subjective parameters on haptic simulation. **6a:** Outline shape of the cavity **6b:** Respect of the depths, **6c:** Regularity of the cavity floor, **6d:** Iatrogenic milling on 45, **6e:** Iatrogenic milling on 46. (*= $p<0.05$)

Figure 7: Comparison of subjective parameters and time G1 vs G2 on ivory model. **7a:** Outline shape of the cavity **7b:** Respect of the depths, **7c:** Regularity of the cavity floor, **7d:** Iatrogenic milling on 45, **7e:** Iatrogenic milling on 46, **7f:** Time

II.3. Impact de la vision 3D dans la simulation haptique en implantologie

II.3.1. Résumé de l'article : « 3D vision and students' performance with haptic simulation in implantology »

La formation en implantologie dentaire est en pleine évolution. A titre d'exemple, en Europe le temps de formation est passé de 38h en moyenne en 2008 à 74h en 2013 ⁶⁸. Ces chiffres traduisent une volonté de plus en plus marquée pour les enseignants de développer la pratique de cette discipline et de ne plus réserver l'implantologie à la formation post universitaire. En formation initiale, la compétence peut être définie comme un mélange de connaissance, de dextérité manuelle, d'attitudes adaptées vis-à-vis du patient et de la situation clinique ⁶⁹. En implantologie, comme dans les autres disciplines médicales, la formation doit satisfaire à l'exigence de sécurisation du patient ^{5,70}. Pour ce faire différentes stratégies pédagogiques peuvent être utilisées afin de développer l'apprentissage de ces disciplines. La simulation haptique qui mêle à la fois réalité virtuelle et dispositif à retour de force est un nouvel outil qui se propose d'offrir un environnement d'apprentissage sécurisant (à la fois pour l'apprenant et pour le futur patient) et reproductible. De plus grâce à des mesures objectives et la possibilité de reproduire à l'infini un exercice les simulateurs haptiques permettent de s'affranchir de la contrainte que représente un nombre croissant d'étudiant face à un nombre d'encadrant souvent en diminution. De nombreuses études ont déjà mis en évidence la capacité de ces simulateurs à distinguer différentes population de niveaux différents, que ce soit dans le domaine de la chirurgie endodontique ³⁷, l'odontologie conservatrice ⁷¹ ou l'implantologie ³⁶.

À l'instar de la simulation aéronautique, médicale ou militaire, la simulation virtuelle haptique en odontologie tente de fournir un environnement le plus fidèle possible en termes de perceptions visuelles, auditives et tactiles. Mais se pose cependant la question du degré de réalisme nécessaire pour atteindre le but fixé, à savoir développer les compétences des étudiants. Par le passé l'utilisation de la vision 3D dans ces simulateurs a montré un intérêt pour la préparation cavitaire ^{34,72} mais aucune étude n'a cherché à valider son intérêt dans le domaine de l'implantologie.

Après avoir montré un impact positif à l'utilisation de la simulation haptique dans l'enseignement des compétences gestuelles en implantologie ³⁶, le travail que nous avons

réalisé cherche à vérifier l'importance du système de vision 3D pour réaliser le forage implantaire en simulation haptique et à apprécier la courbe de progression sur ce simulateur.

Au travers de notre étude nous avons souhaité valider l'utilité d'un dispositif 3D pour l'apprentissage de l'implantologie en simulation.

Dans la limite de ce travail il semble bien que la vision 3D ait un impact réel sur le résultat final de l'intervention. La difficulté d'appréciation de certains paramètres tels que le positionnement du point d'impact en l'absence de vision 3D aboutit à des perforations de la corticale linguale qui, dans une situation réelle, serait source de nombreuses complications.

Il semble donc que les concepteurs doivent prendre en compte l'importance de ce dispositif pour la fabrication des simulateurs haptiques. Les différentes technologies disponibles sur le marché évoluent rapidement et devront à l'avenir être testées et comparées afin de choisir celle qui offrira le maximum de réalisme et de confort d'utilisation pour l'apprenant.

Comme pour l'odontologie conservatrice et les autres domaines de simulation médicale, la vision 3D joue un rôle crucial dans l'utilisation de la simulation haptique en implantologie.

Résumé :

Introduction : Comme nous l'avons démontré dans un précédent travail, la simulation haptique en implantologie dans l'enseignement des compétences gestuelles en implantologie constitue un nouvel outil de formation. Le but de cette étude est de démontrer l'intérêt de la vision 3D lors de la préparation d'un site implantaire en simulation haptique.

Matériels et méthode :

Cette étude prospective randomisée a été menée au sein de l'Ecole de Chirurgie de Nancy, auprès d'une promotion d'étudiants de 2^{ème} année en odontologie de la Faculté d'Odontologie de Nancy répartis aléatoirement en deux groupes. Le groupe 1 (N=45, 23 ♀, 22 ♂) devait réaliser la préparation d'un site implantaire pour une première molaire mandibulaire gauche (36) sur un simulateur haptique. Ce groupe bénéficiait pendant toute la durée de l'étude de la vision 3D à l'aide des lunettes idoine. Le groupe 2 (N=43, 22 ♀, 21 ♂) devait réaliser le même exercice mais ne bénéficiait pas de la vision 3D. Différents paramètres objectifs étaient analysés par le simulateur tels que : la différence de position dans le sens mesio-distal et vestibulo-lingual, la différence de position dans le sens mésio-distal et vestibulo-lingual, la

profondeur de forage, le temps de forage, le temps total, la présence d'une perforation de la corticale (en vestibulaire ou en lingual).

Résultats Discussion :

Une courbe de progression a été mise en évidence pour le groupe 1. Une amélioration significative de la différence de position, de la profondeur de forage, du temps de réalisation, de la différence d'angulation vestibulo-linguale et du nombre de perforations a été trouvée pour le groupe 1. ($p < 0.01$)

La comparaison des paramètres des deux groupes montrait une différence significative pour les paramètres différence de position vestibulo-linguale, temps de préparation, et nombre de perforations ($p < 0.01$)

Conclusion : comme pour l'odontologie conservatrice et d'autres domaines médicaux, la vision 3D joue un rôle crucial dans l'apprentissage de l'implantologie en simulation haptique.

II.3.2. Article : « 3D vision and students' performance with haptic simulation in implantology » soumis prochainement en (Co 1^{er} auteur)

3D vision and students' performance with haptic simulation in implantology.

David JOSEPH^{1,2,3*}, Marin VINCENT^{4*}, Phi Linh NGUYEN-THI⁵, Nathalie PAOLI², Éric MORTIER⁴, Pascal AMBROSINI², Nguyen TRAN^{1,2}

¹UMR-S1116, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

²School of Surgery Nancy-Lorraine, University of Lorraine, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy, France

³Department of periodontology, Faculty of Dentistry, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

⁴Department of conservative dentistry, Faculty of Dentistry, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

⁵Platform of Clinical Research Support PARC, CHRU Nancy, Nancy, F-54000, France.

**These authors contributed equally to this work*

Corresponding authors:

Dr David JOSEPH, School of Surgery Nancy-Lorraine, University of Lorraine, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy, France

david.joseph@univ-lorraine.fr

Introduction:

Training in implantology is evolving. For example, in Europe, training time increased from 38h on average in 2008 to 74h in 2013 (1). These facts reflect a growing willingness on the part of teachers to develop the practice of this discipline and not to reserve implantology for postgraduate training.

In initial training, competence can be defined as a mixture of knowledge, manual dexterity and attitudes adapted to the patient and the clinical situation (2). In implantology, as in other medical field, training must satisfy the requirement of patient safety (3,4). In order to do this, different pedagogical strategies can be used to develop the learning of these disciplines. Haptic simulation that combines both virtual reality and force feedback is a new reproducible tool that aims to provide a safe learning environment (both for the learner and for the future patient). Moreover, thanks to objective measurements and the possibility of unlimited repetition of the exercises, haptic simulators make it possible to get rid of the constraint represented by a growing number of students facing a number of frames that are often decreasing. Many studies have already demonstrated the ability of these simulators to distinguish different populations of different levels, be it in the field of endodontic surgery (5), conservative odontology (6) or implantology (7).

Like aeronautical, medical or military simulation, virtual haptic simulation in odontology tries to provide an environment as faithful as possible in terms of visual, auditory and tactile perceptions. However, the degree of realism necessary to achieve the goal, namely to develop the students' gestural skills, arises. In the past the use of 3D vision in these simulators has been of interest in cavity preparation (8,9) but no study has sought to validate its interest in the field of implantology.

After having shown a positive impact on the use of haptic simulation in the teaching of gestural skills in implantology (7), the work we have carried out seeks to validate the importance of the 3D vision system in performing implant drilling in haptic simulation and to appreciate the learning curve on this simulator.

Material and method:

Population:

The prospective randomized study was carried out within the School of Surgery of Nancy, with a promotion of second-year students in odontology of the Faculty of Odontology of Nancy.

After the randomization, students were divided into 2 groups.

Group 1 (N = 45, 23 ♀, 22 ♂) was to prepare an implant site for a mandibular left first molar (36) on haptic simulator and during the entire study of 3D vision using appropriate glasses.

Group 2 (N = 43, 22 ♀, 21 ♂) had to perform the same exercise but did not benefit from 3D vision.

Each student received a theoretical training with a Powerpoint® presentation explaining the goals of the exercise. Each student was also able to familiarize himself or herself with the simulator in order to feel the sensations and adapt his working positions.

The simulator:

This is the new version of the Virteasy® simulator of which a previous model was used and described in a first study (7). Composed of a Windows® 7 computer, 2 screens (one touch and one 3D view), 3D vision glasses and a Phantom® Desktop (Geomagic™) haptic device to interact with the computer, this virtual environment gives the student a haptic feedback. The Virteasy® software, developed by the company HRV (Laval) allows to simulate different clinical cases adapted to the learning of gestures in odontology. For the purposes of the study we used an implantology exercise simulating the realization of an implant drill at the level of a 36 with an implant of 4.5 mm * 11 mm.

The drill bits used were:

During the exercise, the learners had to use successively:

- * Bur diameter 1.8 mm (optional),
- * 2 mm drill,
- * 2.4 mm drill,
- * 3.5 / 5 mm drill.

Help available:

Different virtual aids could be displayed to facilitate tracking:

- * The positioning aid that indicates the point of impact,
- * Angulation aid which indicates the 3D positioning,
- * Depth aid that indicates drilling depth during site preparation.

During the realization of the experiment the positioning and depth aid are always available, only the angulation aid is suppressed after a learning phase.

Evaluation Criteria:

The simulator allows the recording of different parameters for objective evaluation that are:

- The difference of position in the mesio-distal direction,
- The difference of position in the bucco-lingual direction,
- The difference of angulation in the mesio-distal direction,
- The difference of angulation in the bucco-lingual direction,
- The drilling depth,
- The drilling time,
- The total time,
- The presence of a perforation of the cortical bone (buccal or lingual).

Concerning time, the students were allowed a maximum of 2 minutes for the drilling and 5 minutes for the realization of the exercise.

Statistical analysis:

Analysis was performed with GraphPad® Prism (San Diego, CA, USA). The results are expressed as mean $\pm$ standard deviation $m \pm SEM$. An ANOVA or t-test was used to compare performance. The frequency analysis was carried out by a Fisher test. A $P < 0.05$ is considered significant.

Results:

Evolution of the objective parameters for group 1: Figure 1 (a, b, c, d, e, f)

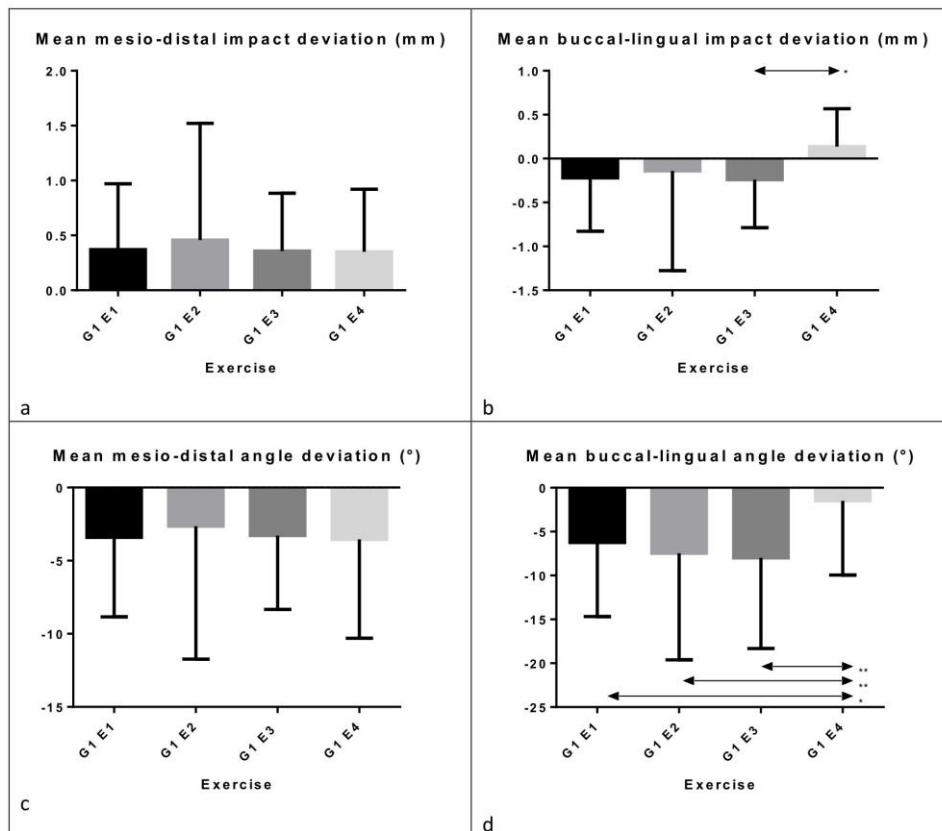
Group 1 showed an improvement of the parameters over time. Concerning the difference in mesio-distal position, it increased very slightly during attempt No. 2 and then decreased and stabilized in

the fourth test. The differences were not statistically significant. As for the difference in position in the bucco-lingual aspect, which improved over time, the fourth test even showed an inversion of this difference with a more vestibular point of impact compared to the first attempt ($P < 0,01$).

The difference in angulation, whether in the mesio-distal or bucco-lingual direction, was the most difficult parameter to grasp. However, no significant difference over time was noted for the difference in mesio-distal angulation. On the other hand, an improvement in the angular bucco-lingual difference was noted over time ($E1$ vs $E4$ $P < 0.01$, $E2$ vs $E4$ $P < 0.01$, $E3$ vs $E4$ $P < 0.01$).

The drilling depth improved slightly between the first and the last test ($P < 0.05$), similarly the drilling time improved significantly during the various tests ($E1$ vs $E3$ $P < 0.01$, $E1$ vs $E4$ $P < 0.01$, $E2$ vs $E4$ $P < 0.01$, $E3$ vs $E4$ $P < 0.01$)

Lastly, with regard to the perforations, we noticed a decrease of these perforations from 6 in the first session, to 5 in the second, to 2 in the third and finally 5 perforations when the angulation aid was no longer available.



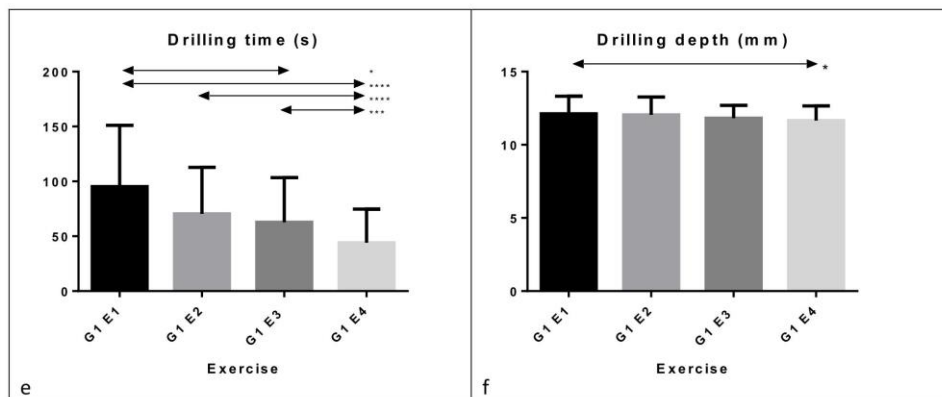
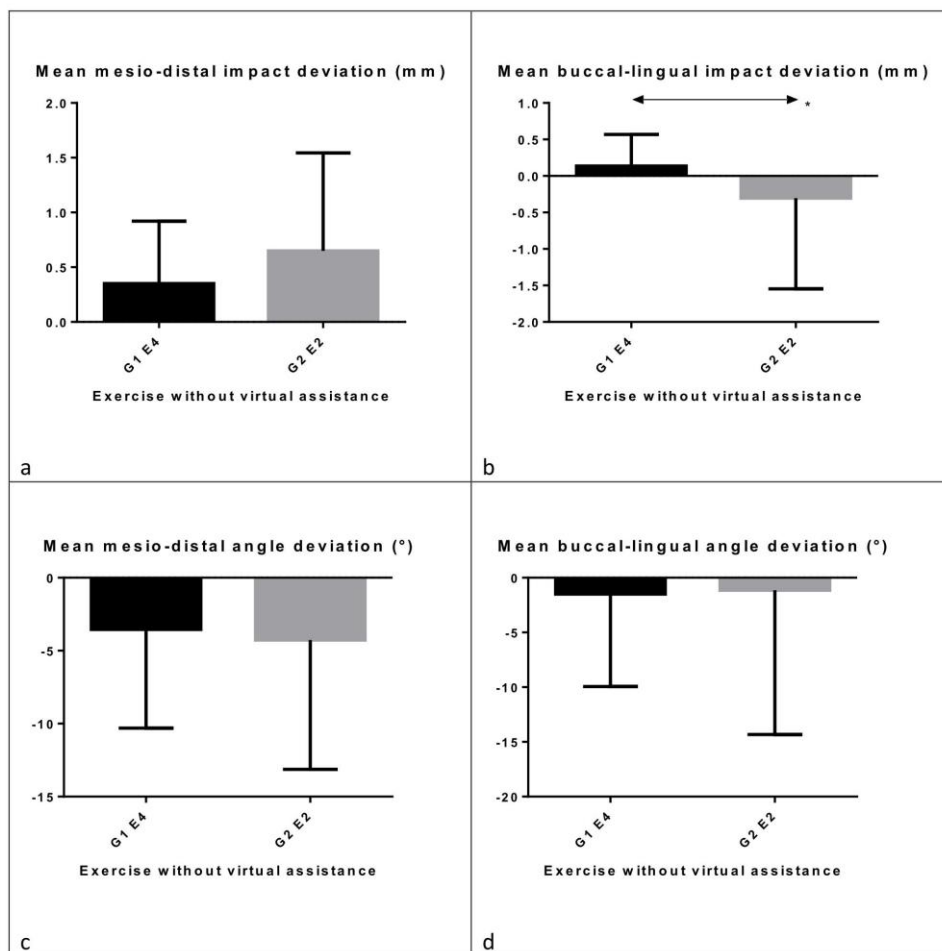


Figure 1:Figure 1 (a,b,c,d,e,f): Parameters evolution for Group 1 (*= p<0.05 ***=p<0.0001)

Comparison of results between group 1 and 2 (without virtual aid): Figure 2 (a, b, c, d, e, f)

Of all the parameters studied, differences in position in the mesio-distal and especially bucco-lingual direction showed a notable difference between the 2 groups, going from $0.13 \text{ mm} \pm 0.06$ for group 1 to $-0.30 \text{ mm} \pm 0.18$ ($P < 0.05$) for group 2; Group 2 (not benefiting from 3D) positioned the implant more lingually. In the mesio-distal direction, group 2 showed a tendency to position the center more distally than group 1 without this being significant. The mean of angular deviation, whether mesio-distal or bucco-lingual, showed no difference between the two groups. Only the variance between the 2 groups was significantly different for bucco-lingual angulation. Similarly, the drilling depth did not differ significantly in the 2 populations studied, going from $11.66 \text{ mm} \pm 0.14$ for group 1 to $11.83 \text{ mm} \pm 0.12$ for group 2. Once again, the time of drilling showed a significant difference between the 2 groups, ranging from $44.13 \text{ s} \pm 4.5$ for group 1 to $59.21 \text{ s} \pm 3.9$ for group 2. Finally, the perforation parameter was the most affected, going from 6 in group 1 to 14 in group 2.



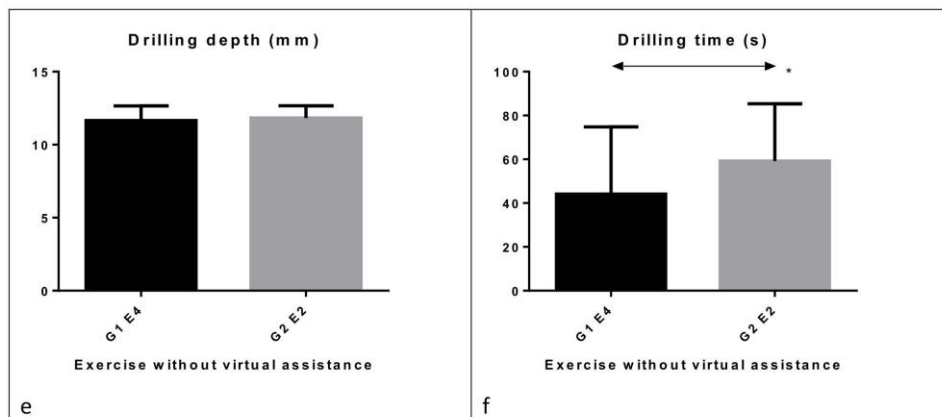
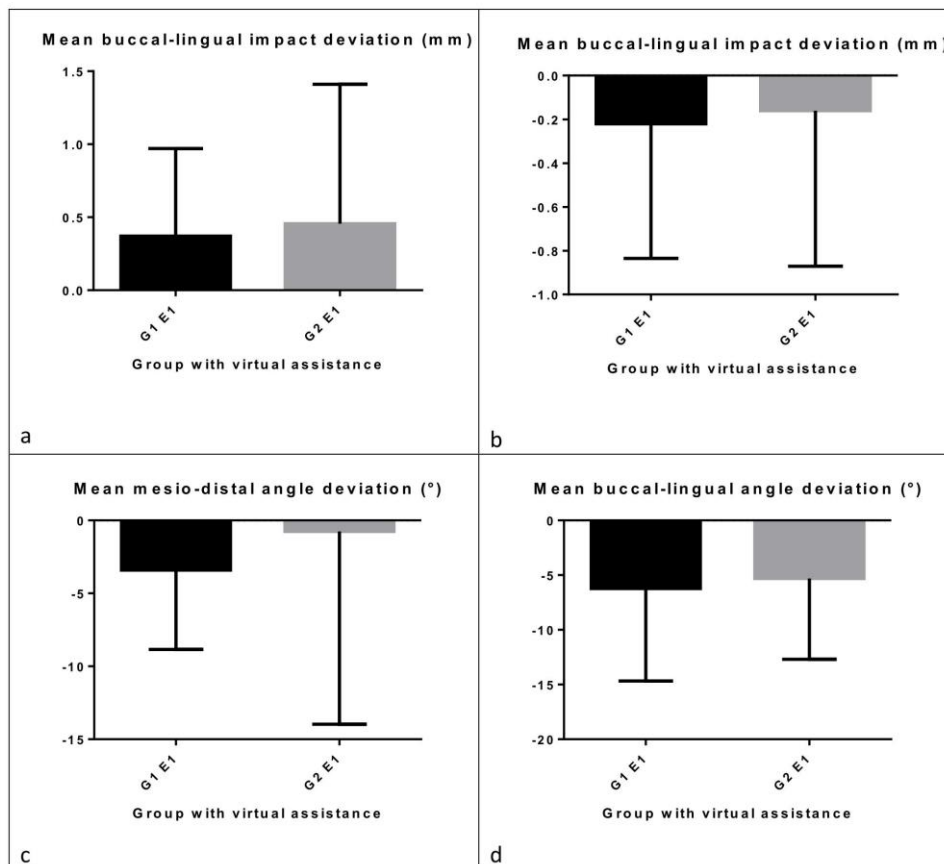


Figure 2: Comparison of the parameters of the 2 groups without virtual assistance.

(* = $p < 0.05$ *** = $p < 0.0001$)

Comparison of results between group 1 and 2 (with virtual assistance): Figure 3 (a, b, c, d, e, f)

There was no significant difference between the 2 groups in all the parameters studied. For the difference in position in the mesio-distal direction, it went from 0.37 ± 0.08 for group 1 to 0.45 ± 0.14 for group 2. For the bucco-lingual difference, the latter increased from -0.22 ± 0.09 for group 1 to -0.16 ± 0.10 for group 2. The mesio-distal angular deviation, although slightly better in group 2, showed no significant difference (-3.40 ± 0.81 for group 1 vs -0.75 ± 2.01 for group 2). As for angular deviation in the bucco-lingual direction, no significant difference was observed, even though it was smaller in group 2 (-6.23 ± 1.25 group 1 vs -5.30 ± 1.12). There were no significant differences between the two groups in terms of duration and depth of drilling. Finally, the perforations were identical in the 2 groups, namely 6.



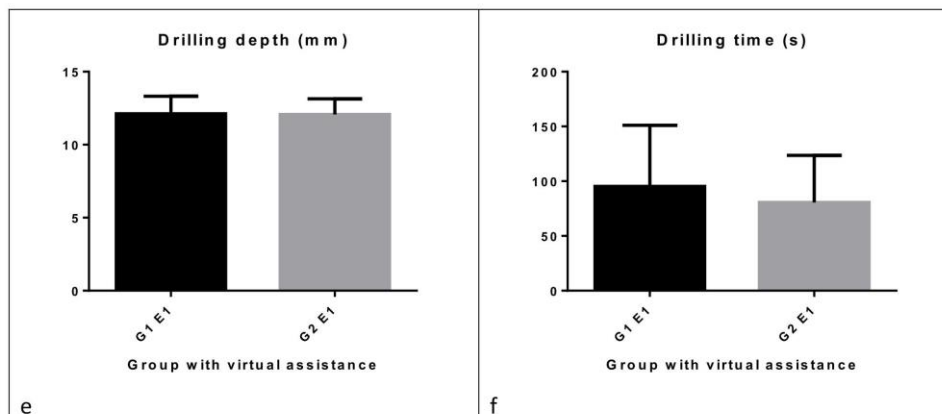


Figure 3: (a, b, c, d, e, f): Comparison of groups with virtual aids

Discussion:

Haptic simulators used in this experiment are part of the high-fidelity simulators. They propose to provide the most realistic environment possible thanks to a haptic device and the visualization of a scene in 3D. The different elements used must make it possible to increase the degree of realism of the simulator (= fidelity). The increase in the fidelity of the simulator includes, among other things, the graphical fidelity that must be investigated (10). In the past, the use of 3D vision has been of interest in various fields such as neuroendoscopic surgery (11,12) or laparoscopic surgery (13–16) and robotic surgery (17). Here we wanted to observe the interest of the 3D vision on the skills of the learners but also the interest of digital aids for the learning of implantology in haptic simulation.

3D vision in simulation is sometimes the cause of visual discomfort leading to headaches, vertigo which can ultimately disturb the apprentice, the intensive use of a stereoscopic vision system leading to eye strain (18,19). This is why it is interesting to know if the use of 3D vision is essential for training in implantology on a simulator.

In conservative odontology it has been shown that the use of 3D vision in haptic simulators allows better results to be obtained (20).

In our study we compared the performances of 2 groups of the same level, benefiting or not from the 3D vision in an implantology exercise. None of the participants had ever performed implantology drilling and all had received the same instructions.

We were able to note that, in the presence of virtual aids and 3D vision, the groups presented similar results for the different parameters, demonstrating the importance of a digital companion in the learning of implant surgery gestures (Fig 3 a, b, c, d, e, f). Moreover, as we have shown in a previous study (7), a learning curve could be demonstrated, with Group 1 showing a constant improvement of the parameters over time with a reduction in variability even in the absence of the angulation aid. (Fig. 1 a, b, c, d, e, f)

On the other hand, removing the virtual angulation aid as well as the 3D vision led to a marked decrease in the performance of group 2 with 14 perforations, against 6 in group 1.

It is interesting to note that the 2 objective criteria that showed a significant difference between the 2 groups were the bucco-lingual position difference and the drilling time (Fig 2b, f). Regarding the difference in position, the absence of 3D vision was to be a determining factor because the 2 groups always benefited from the positioning aid for the realization of this exercise and only the angulation aid was suppressed. The second parameter that showed a significant difference between the two groups was drilling time. The two main reasons for this are: firstly, the opportunity that was given to group 1 to get accustomed to the simulator for 2 more sessions and thus to be more confident and quicker with the use of the digital tool; secondly, the presence of the 3D vision as suggested by Bhayani and col (15) on the use of 3D in laparoscopic surgery.

The presence of 3D vision and digital aids are therefore important elements to take into account in developing these new digital learning tools.

Conclusion:

In our study, we wanted to validate the impact of a 3D device in a haptic simulation environment for implantology training.

Within the limit of this work it seems that the 3D vision has a real impact on the final result of the intervention. The difficulty of evaluating some parameters such as the positioning of the point of impact in the absence of 3D vision results in perforations of the lingual cortical which in a real situation would cause many complications.

It seems therefore that designers must be aware of the importance of 3D devices when manufacturing haptic simulators. The different technologies available on the market evolve rapidly and in the future will have to be tested and compared in order to choose the one that will offer the best realism and comfort of use for the learner.

Like in conservative odontology and other areas of medical simulation, 3D vision has a critical impact in the use of haptic simulation in implantology.

Bibliography:

1. Koole S, Vandeweghe S, Mattheos N, De Bruyn H. Implant dentistry education in Europe: 5 years after the Association for Dental Education in Europe consensus report. *Eur J Dent Educ.* 1 mars 2014;18:43-51.
2. Plasschaert AJM, Manogue M, Lindh C, McLoughlin J, Murtomaa H, Nattestad A, et al. Curriculum content, structure and ECTS for European dental schools. Part II: methods of learning and teaching, assessment procedures and performance criteria. *Eur J Dent Educ.* août 2007;11(3):125-36.
3. Okuda Y, Bryson EO, DeMaria S Jr, Jacobson L, Quinones J, Shen B, et al. The utility of simulation in medical education: what is the evidence? *Mt Sinai J Med.* août 2009;76(4):330-43.
4. Bilotta FF, Werner SM, Bergese SD, Rosa G. Impact and Implementation of Simulation-Based Training for Safety. *ScientificWorldJournal.* 2013;2013:652956.
5. Pohlenz P, Gröbe A, Petersik A, von Sternberg N, Pflesser B, Pommert A, et al. Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *J Craniomaxillofac Surg.* déc 2010;38(8):560-4.
6. Eve EJ, Koo S, Alshihri AA, Cormier J, Kozhenikov M, Donoff RB, et al. Performance of Dental Students Versus Prosthodontics Residents on a 3D Immersive Haptic Simulator. *J Dent Educ.* 4 janv 2014;78(4):630-7.
7. Joseph D, Jehl J-P, Maureira P, Perrenot C, Miller N, Bravetti P, et al. Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology. *BioMed Research International.* 20 févr 2014;2014:e413951.
8. Gal GB, Weiss EI, Gafni N, Ziv A. Preliminary assessment of faculty and student perception of a haptic virtual reality simulator for training dental manual dexterity. *J Dent Educ.* avr 2011;75(4):496-504.
9. Ben-Gal G, Weiss EI, Gafni N, Ziv A. Testing manual dexterity using a virtual reality simulator: reliability and validity. *European Journal of Dental Education.* 2013;17(3):138-142.
10. Wang D, Li T, Zhang Y, Hou J. Survey on multisensory feedback virtual reality dental training systems. *Eur J Dent Educ.* 1 nov 2015;n/a-n/a.
11. Marcus HJ, Hughes-Hallett A, Cundy TP, Di Marco A, Pratt P, Nandi D, et al. Comparative Effectiveness of 3-Dimensional vs 2-Dimensional and High-Definition vs Standard-Definition Neuroendoscopy: A Preclinical Randomized Crossover Study. *Neurosurgery.* avr 2014;74(4):375-81.
12. Fraser JF, Allen B, Anand VK, Schwartz TH. Three-dimensional neurostereoscopy: subjective and objective comparison to 2D. *Minim Invasive Neurosurg.* févr 2009;52(1):25-31.

13. Lusch A, Bucur PL, Menhadji AD, Okhunov Z, Liss MA, Perez-Lanzac A, et al. Evaluation of the impact of three-dimensional vision on laparoscopic performance. *J Endourol.* févr 2014;28(2):261-6.
14. Votanopoulos K, Brunicardi FC, Thornby J, Bellows CF. Impact of three-dimensional vision in laparoscopic training. *World J Surg.* janv 2008;32(1):110-8.
15. Bhayani SB, Andriole GL. Three-Dimensional (3D) Vision: Does It Improve Laparoscopic Skills? An Assessment of a 3D Head-Mounted Visualization System. *Rev Urol.* 2005;7(4):211-4.
16. Tanagho YS, Andriole GL, Paradis AG, Madison KM, Sandhu GS, Varela JE, et al. 2D versus 3D visualization: impact on laparoscopic proficiency using the fundamentals of laparoscopic surgery skill set. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A.* nov 2012;22(9):865-70.
17. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl J-P, Felblinger J, Bresler L, et al. The virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc.* sept 2012;26(9):2587-93.
18. Lambooi M, Fortuin M, Heynderickx I, IJsselsteijn W. Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *Journal of Imaging Science and Technology.* 1 mai 2009;53(3):30201-1-30201-14.
19. Shibata T, Kim J, Hoffman DM, Banks MS. The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision.* 5 juill 2011;11(8):11-11.
20. de Boer IR, Wesselink PR, Vervoorn JM. Student performance and appreciation using 3D vs. 2D vision in a virtual learning environment. *Eur J Dent Educ.* 1 août 2016;20(3):142-7.

II.4. Contribution des accéléromètres dans l'évaluation objective des compétences chirurgicales en odontologie

II.4.1. Résumé de l'article : « Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students: an accelerometer based approach »

Résumé :

But de l'étude: L'évaluation des compétences gestuelles en odontologie est une tâche très complexe. Le besoin de certification passe par l'évaluation de la compétence faisant appel à des paramètres plus objectifs. Notre objectif était d'évaluer si l'utilisation de capteurs du type accéléromètre peut contribuer à distinguer l'efficacité dans le geste thérapeutique entre des experts et novices dans la réalisation des sutures chirurgicales.

Matériels et méthode: trois groupes de participants: novices ($n = 8$), intermédiaires ($n = 14$) et experts ($n = 7$) étaient inscrits à l'étude. Ils ont dû effectuer différents types de sutures utilisées en chirurgie orale et parodontale. Nous avons utilisé deux capteurs sans fil positionnés au poignet pour mesurer objectivement l'accélération des deux mains et déduire l'économie et la fluidité du mouvement.

Un enregistrement vidéo a également été utilisé pour compléter l'évaluation.

Résultats: les critères de temps et de mouvement étaient corrélés significativement avec le niveau d'expertise du participant. Le facteur temps total a un effet significatif avec le niveau d'expérience ($p = 0,006$). La fluidité du mouvement a également montré des variations significatives entre les groupes.

Conclusion: l'utilisation d'accéléromètres couplés à l'analyse d'image pourrait permettre d'envisager dans le futur, une évaluation objective pour ce type de geste chirurgical.

II.4.2. Article : « Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students: an accelerometer based approach » soumis dans le « International Journal of Industrial Ergonomics », (Co 1^{er} auteur) IF = 1.415

Manuscript Details

Manuscript number	ERGON_2017_219
Title	Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students: an accelerometer based approach
Article type	Research Paper

Abstract

Aim of study: Gestural skills assessment in odontology is a highly complex task. Although mandatory for certification, proficiency assessment is still required for parameters that are more objective. Our aim was to assess whether accelerometer sensors might contribute to distinguishing efficiency in therapeutic gesture from experts and novices in the realization of surgical sutures. Material and method: 3 groups of participants: novices (n = 8), intermediaries (n = 14) and experts (n = 7) were enrolled in the study. They had to perform different types of odontological suture. We used 2 wireless wrist sensors to measure objectively the acceleration of both hands and to deduce the economy and the fluidity of the movement. A video recording was also used to complete the assessment. Results: The time and motion criteria were documented to significantly correlate with the experience of the participant. The total time factor has a significant effect with the experience level ($p = 0.006$). The fluidity of the movement has also been shown to vary significantly between groups. Conclusion: The use of accelerometers coupled with image analysis could make it possible to envisage in the long run an objective evaluation for this type of surgical gesture.

Taxonomy	Modelling, Industrial Observation Methods, Medicine, Systems Engineering, Individual Abilities
Corresponding Author	Giovanny Arbelaez-Garces
Corresponding Author's Institution	Univertisté de Lorraine - ERPI
Order of Authors	Giovanny Arbelaez-Garces, David Joseph, Mauricio CAMARGO, Nguyen Tran, Laure Morel
Suggested reviewers	Alan Godfrey, Alicia Ponton-Carss

Submission Files Included in this PDF

File Name [File Type]

Highlights.docx [Highlights]

Paper-IJIE-VF.docx [Manuscript File]

To view all the submission files, including those not included in the PDF, click on the manuscript title on your EVISE Homepage, then click 'Download zip file'.

**Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students:
an accelerometer based approach**

Authors: Giovanni Arbelaez-Garces¹, David Joseph^{2,3,4}, Mauricio Camargo¹, Nguyen Tran⁴, Laure Morel¹

¹ Université de Lorraine, ERPI, EA 3767, F-54000 Nancy, France

² Department of periodontology, Faculty of Dentistry, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

³ UMR-S1116, University of Lorraine, 54000 Nancy, France

⁴ School of Surgery Nancy-Lorraine, University of Lorraine, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy, France

***Corresponding author:**

Giovanny Arbelaez-Garces, PhD.

Email: giovanny.arbelaez-garces@univ-lorraine.fr

Contribution to the objective assessment of technical skills for surgery students: an accelerometer based approach

Abstract:

Aim of study: Gestural skills assessment in odontology is a highly complex task. Although mandatory for certification, proficiency assessment is still required for parameters that are more objective. Our aim was to assess whether accelerometer sensors might contribute to distinguishing efficiency in therapeutic gesture from experts and novices in the realization of surgical sutures.

Material and method: 3 groups of participants: novices ($n = 8$), intermediaries ($n = 14$) and experts ($n = 7$) were enrolled in the study. They had to perform different types of odontological suture. We used 2 wireless wrist sensors to measure objectively the acceleration of both hands and to deduce the economy and the fluidity of the movement. A video recording was also used to complete the assessment.

Results: The time and motion criteria were documented to significantly correlate with the experience of the participant. The total time factor has a significant effect with the experience level ($p = 0.006$). The fluidity of the movement has also been shown to vary significantly between groups.

Conclusion: The use of accelerometers coupled with image analysis could make it possible to envisage in the long run an objective evaluation for this type of surgical gesture.

Keywords: Objective assessment, basic skills, suturing, dental pedagogic strategy, accelerometers

1. Introduction

The use of simulators and inanimate models for surgical training has slowly spread in training institutions around the world during the last ten years. Simulators allow trainers the freedom to assess and manage the complexity of the clinical scenario for students without risking patients' safety (Acton, 2015). The emergence of these technologies has not only revolutionized the training of surgical skills, but the assessment of surgeons in these techniques has become an important concern (Pellegrini, 2012). Moreover, being able to objectively assess surgeons' technical skills has become an important research topic and a principal concern for surgical training.

Most screen-based simulators allow direct assessment of gesture and enable immediate feedback. However, for other types of technologies such as inanimate models, an expert surgeon performs the assessment. Traditional skill assessment is subjective to the evaluator and can be influenced by several factors. To limit this problem, different strategies have been implemented, such as OSCE (objective structured clinical evaluation) (Scott, Evans, Drummond, Mossey, & Stirrups, 2001), analysis, videos, and more recently haptic simulation (Joseph et al., 2014). This highlights the need for a more objective assessment (Shaharan, 2014). The aim of this paper is thus to propose a method for objective surgical skills assessment using motion sensors.

(Datta, Mackay, Mandalia, & Darzi, 2001) proposed using motion-tracking analysis to objectively measure surgical skills. Their study suggested that hand motion analysis can be an effective objective measure of dexterity. However, their study focused only on quantity of hand movements and time to complete the task. (Sánchez et al., 2014) proposed a method of evaluating laparoscopic skills using accelerometers. However, their work only focused on economy of movement criteria. In order to assess the complexity of the surgical skills put into practice during a procedure, several criteria need to be assessed, some of which might not be covered by motion sensors. In this paper, the complexity of surgical skills assessment is covered by completing the motion sensor data with criteria from an OSCE (Hanson, Mossey, & Macluskey, 2010; Niitsu et al., 2013). To validate the use of motion sensors (accelerometers) as a new objective evaluation strategy, we put in place a preliminary

101 prospective study at the Nancy-Lorraine Surgery School. The study allowed us to check whether there
102 is a relationship between the measurements made by motion sensors and a subjective evaluation when
103 performing a basic surgical procedure in dentistry (sutures). A mixed method integrating objective
104 and subjective criteria was then proposed and validated. The results obtained were then compared
105 with the traditional OSCE based evaluation method.

106
107 The remainder of the paper is structured as follows: Section 2 presents an overview of research related
108 to surgical skill assessment and particularly on the usage of accelerometers. Section 3 describes
109 materials and methods used in the study. Sections 3.2 present the results, which are then discussed in
110 Section 4. Section 5 presents the conclusions of the paper.

111

112 **2. Related research**

113 **2.1. Surgical training and skills assessment**

114 According to Fitts and Posner's theory of motor skill acquisition, it is divided into three stages (Fitts
115 & Posner, 1967). The first stage is cognition; in this stage the learner is shown the basic elements of a
116 surgical intervention, making a knot for example. The learner must understand the mechanics related
117 to the skill, the way to move the hands, take the fill, etc. With practice, the learner goes through the
118 integration stage; he becomes able to execute the task in a fluid manner with few interruptions. Then,
119 in the automation stage, the activity is not only fluid but is carried out with almost no errors. When
120 applied to surgical training, the first two steps of this model can be done without prior contact with
121 patients through the acquisition of the basic skills of the surgical technique.

122

123 Despite technological advances, surgical education has remained almost unaltered for over a century.
124 The "see one, do one, teach one" model, which until a few years ago was offering good results, is
125 limited by the availability of expert surgical physicians, by the diversity of procedures, the amount of
126 patients available and, more importantly, by the need to maintain patient safety (Morris, 2005). There
127 are many surgical training devices that can be used in the learning process: inanimate models, virtual
128 reality, synthetic and cadaveric animal models, as well as real patients for education of critical
129 incidents (Acton, 2015; R. K. Reznick & MacRae, 2006). Some of these models are very expensive
130 and some have limited availability. Using animals is difficult because of ethical concerns, high cost,
131 and the need for special equipment. On the other hand, inanimate synthetic models are portable,
132 reliable, and a little less expensive than earlier varieties.

133

134 Inanimate models are, however, at a disadvantage compared to virtual simulators because the latter
135 allow us to directly assess the technical skill of the student without the intervention of an expert
136 trainer. In order to objectively evaluate skills, performance verification lists or OSATS (Objective
137 Structured Assessment of Technical Skills) are commonly used (R. Reznick, Regehr, MacRae,
138 Martin, & McCulloch, 1997). However, the use of OSATS requires the implication of an experienced
139 practitioner as judge. Technological tools could be used to assess some skill parameters and can
140 become complementary to the objectivity of the evaluator (R. K. Reznick & MacRae, 2006).

141

142 One of the challenges in skill assessment is to choose which parameters to measure (van Hove,
143 Tuijthof, Verdaasdonk, Stassen, & Dankelman, 2010). Hand movement analysis allows measurement
144 of motricity and dexterity (Mason, Ansell, Warren, & Torkington, 2013). In surgical skill assessment,
145 this analysis can easily be performed with a motor sensor or accelerometer (D'Angelo et al., 2015).
146 Three parameters have mainly been used in studies concerning surgical skills: time, economy of
147 movement, and path length. Table 1 summarizes the main studies concerning movement analysis in
148 surgical skills assessment and the parameters that were used.

149 Table 1. Movement analysis metrics used for surgical skills assessment.

Reference	Conceptual validation		
	Time	Economy of movement	Path Length
(Datta et al., 2001)	Yes	No	Yes
(Aggarwal et al., 2007)	Yes	Yes	Yes
(Datta, Chang, Mackay, & Darzi, 2002)	Yes	Yes	Non-treated
(Brydges, Classen, Larmer, Xeroulis, & Dubrowski, 2006)	Yes	Yes	Non-treated
(Brydges, Sidhu, Park, & Dubrowski, 2007)	Yes	Yes	Non-treated
(Smith, Torkington, Brown, Taffinder, & Darzi, 2002)	Yes	Yes	Yes
(Moorthy et al., 2004)	Yes	Non-treated	Yes
(S. D. Bann, Khan, & Darzi, 2003)	Yes	Yes	Non-treated
(Brydges et al., 2006)	Yes	Yes	Non-treated

150

151 2.2. Assessment metrics

152 The metrics for assessing surgical skills performance can be divided into two categories: efficiency
 153 metrics and quality metrics (Fried & Feldman, 2008). Efficiency metrics are measurable physical
 154 parameters, requiring the use of motion devices to be acquired. They are objective, reproducible, and
 155 not prone to misinterpretation. An efficiency metric should not only provide information about the
 156 intervention, but also help to identify key success and failure factors, in addition to being able to
 157 distinguish an expert from a novice (Oropesa et al., 2011). Quality metrics concern the definition and
 158 execution of a task; they are parameters that cannot be quantified – for example, knowledge of the
 159 procedure, final outcome of the intervention, knowledge of instrument handling, etc. Table 2 and
 160 Table 3 summarize the most commonly used metrics to discern the surgeon's experience.

161 Table 2. Efficiency metrics for surgical skills assessment.

Efficiency metrics	Description	Units
Time	The time needed to complete an intervention. It's commonly related to surgical skills. The greater the experience in the intervention, the less time it takes to complete.	<i>min, sec</i>
Path Length	The cumulative distance based on tool movement during the intervention. It is also commonly related to the surgeon's precision.	<i>m, cm, mm</i>
Jerk	These are sudden movements resulting in changes in the acceleration.	$\frac{m}{sec^3}$
Speed	The speed of change of position of the instruments per second.	$\frac{m}{sec}$

Economy of movement (MOE)	Execution of the intervention with a limited number of movements. It is defined as the total number of hand movements per second (S. Bann, Darzi, Munz, Kumar, & Moorthy, 2004).	$\frac{\text{movements}}{\text{sec}}$
----------------------------------	--	---------------------------------------

162

163 **Table 3. Quality metrics for surgical skill assessment.**

Quality metrics	Description
Results	Analysis of the intervention outcome
Errors	Number of errors during the intervention
Instrument handling	Proper knowledge and use of the instruments during the procedure
Knowledge of specific procedure	Knowledge of the entire procedure

164

165 It appears that using a single type of metric to evaluate the surgeon's skills is not enough, but the
166 assessment must be a combination of the two types (Fried & Feldman, 2008). Using only one of the
167 metrics mentioned above may be misleading; for example, in the case of a suture, the time required to
168 complete the task is irrelevant if the point does not approach the tissue correctly or the node is poorly
169 executed. For these reasons it is advised to use the two types of metrics (Ponton-Carss, Kortbeek, &
170 Ma, 2016).

171

172 As seen from the previous tables, efficiency metrics require the use of different technologies to be
173 evaluated. Accelerometers and motion analysis have been used in the evaluation of the next section,
174 which discusses some of the existing works.

175

176 **2.2.1. Motion analysis usage**

177 The use of motion-tracking analysis to assess surgical skills has already been proposed by (Datta et
178 al., 2002, 2001) using electromagnetic devices and video analysis of hand movement. Their study
179 suggested that hand motion analysis can be an effective objective measure of dexterity. However,
180 their study focused only on quantity of hand movements and time to complete the task. (Sánchez et
181 al., 2014), on the other hand, proposed assessing laparoscopic skills using low-cost accelerometers
182 similar to those present in smartphones, though their work was restricted to the assessment of
183 economy of movement criteria.

184 Most of the existing works have focused on laparoscopic interventions that have a reduced field of
185 motion. While a correlation between OSATS and motion analysis assessments had already been
186 shown (Datta et al., 2001), in order to assess the complexity of the surgical skills put into practice
187 during a procedure several criteria need to be assessed, some of which might not be covered by
188 motion sensors only. To the best of our knowledge, there is no proposal for surgical skill assessment
189 done with OSATS guides and motion tracking. For this reason, in this paper we present a proposal to
190 assess surgical skills combining accelerometers and standardized assessment guide.

191 **3. Towards an objective surgical skills assessment**

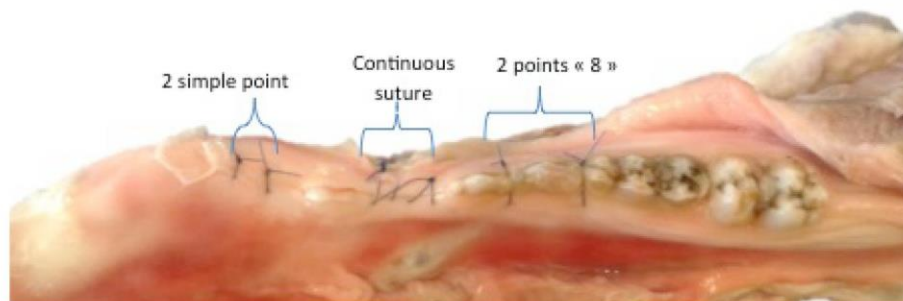
192 In order to propose an objective assessment using an accelerometer, it was first necessary to verify the
193 relevance of using the accelerometer to differentiate the experience level of the participants in the
194 study, then to verify if it can be used as an assessment tool and to use it to compare the results with an

195 assessment performed by an expert evaluator (traditional method). The proposed study is presented in
196 the next section.

197 3.1. Materials and methods

198 **General study design:** This study was conducted at the School of Surgery of Nancy, *Université de*
199 *Lorraine* in France. In total, 29 participants were recruited from the school's faculty of dentistry, and
200 three groups per experience level were formed: "experienced" (n=7), "intermediate" (n=14) and
201 "novice" (n=8). Experienced practitioners formed the first group, with a focus on oral surgery,
202 periodontics, and implantology. The intermediate group consisted of 6th year dentistry students, while
203 individuals without any dental surgery practice formed the novice group.

204
205 **Exercise protocol:** All participants receive a theoretical instructional form indicating the procedures
206 to be performed. Each participant is asked to perform: 2 Single 0 points, 2 points in 8 and a single
207 running suture with 4 passes of the needle on the lower jaw of a pig, the flaps of which are retracted
208 prior to the operation (c.f. Figure 1).



209
210 **Figure 1. Protocol exercise suture points.**

211
212 **Motion Sensors:** Two wireless motion sensors (Captiv T-sense, Tea®, Nancy), placed in the
213 participant's wrist, were used to record the hand acceleration in the 3 axes of movement (x,y,z) at a
214 frequency of 128 Hz. The sensors were fixed at the participants' wrists at the beginning of the
215 exercise, the X-axis pointing to the back of the participant.

216
217 **Procedure:** Each participant is equipped with the motion sensors and then they are asked to perform
218 the exercises from the protocol (suture points).

219 For standardized procedures, the distance between the elbow and the floor of the participants is
220 identical for all subjects (94 cm).

221 Each operator is filmed anonymously throughout the completion of the procedure using a camcorder
222 (Everio GS TD1, JVC).

223 Instrumentation available to achieve the sutures is identical for all participants and includes:

- 224 • Flexocrin 4.0 wire (Braun®)
- 225 • Castroviejo Clamp
- 226 • Surgical scissors
- 227 • Surgical tweezers

228 At the end of the procedure, a picture of the work is also taken and used to complete the evaluation of
229 the participants.

230 Recording is started and stopped with the participants' hands lying flat on the table. This is a
 231 reference in terms of acceleration for the beginning and the end of the test.

232 **Study of subjective skills:** In order to have a reference evaluation of each subject's performance to
 233 compare with the information collected by the motion sensors, all the videos are broadcast on a
 234 private "youtube" link to be single blind evaluated by an experienced practitioner. Each video is
 235 evaluated by the practitioner on five criteria with a score from 1 to 5: *Respect of tissues, Time and*
 236 *movement, Instrument handling, Operation flow, and Knowledge of the procedure*. The score for each
 237 participant ranges between 5 and 25 points. The evaluation criteria used in the expert assessment were
 238 taken from the Hanson study of 2010 (Hanson et al., 2010), which we have completed with those of
 239 Nitsu et al. (Niitsu et al., 2013). Table 4 shows the scale used during the assessment for each criterion.

240

241 **Table 4. Evaluator assessment scale.**

Respect of tissue				
1	2	3	4	5
<i>Frequently used unnecessary force on tissue or caused damage by inappropriate use of instruments</i>	intermediate situation	<i>Careful handling of tissue but occasionally caused inadvertent damage</i>	intermediate situation	<i>Consistently handled tissue appropriately with minimal damage</i>
Time and motion				
1	2	3	4	5
<i>Many unnecessary moves</i>	intermediate situation	<i>Efficient time/motion but some unnecessary moves</i>	intermediate situation	<i>Clear economy of movement and maximum efficiency</i>
Instrument handling				
1	2	3	4	5
<i>Repeatedly makes tentative or awkward moves with instruments by inappropriate instrument</i>	intermediate situation	<i>Competent use of instruments but occasionally appeared stiff or awkward</i>	intermediate situation	<i>Fluid moves with instruments and no awkwardness</i>
Flow of operation				
1	2	3	4	5
<i>Frequently stopped operating and seemed unsure of next move</i>	intermediate situation	<i>Demonstrated some forward planning with reasonable progression of procedure</i>	intermediate situation	<i>Obviously planned course of operation with effortless flow from one move to the next</i>
Knowledge of specific procedure				
1	2	3	4	5
<i>Deficient knowledge. Needed specific instruction at most steps</i>	intermediate situation	<i>Knew all important steps of operation</i>	intermediate situation	<i>Demonstrated familiarity with all aspects of operation</i>

242

243 **Objective analysis of operation flow and economy of movement:** From the acceleration data
244 provided by the motion sensors, it was possible to calculate the standard speed of the overall
245 operation and by integrating it, a distance indicator (path length) linked to the global motion is
246 obtained. This criterion reflects if there is an economy of movement in comparison with other
247 candidates and can be directly compared with the “*time and movement*” criteria of the subjective
248 evaluation.

249 To objectively assess the “*operation flow*” we used the total acceleration; then, using conditional
250 formatting in R, a rating of 1 to 5 could be given to each participant for these two parameters. A
251 detailed explanation of the calculations is given in the following section.

252 **Statistical analysis:** The results were expressed as mean $\pm$ standard deviation from the mean ($m \pm$
253 SEM). A one factor ANOVA or t-test two-tailed t was used to compare performance between groups.
254 The frequency analyses were made using the Fischer test. Probability $P < 0.05$ was considered
255 statistically significant. For the pairs that showed a significant correlation a post-hoc HSD Tukey test
256 was used. Analyses were made using the R language (R Foundation for Statistical Computing,
257 Vienna, Austria) and RStudio (RStudio inc., Boston, MA, USA).

258 3.2. Results

259 3.2.1. Expert assessment of each participant video using the evaluation grid

260 The total scores obtained by participants range from 5-23 on a scale from 5 to 25 (cf. Table A.7). The
261 *average scores* ranged from 14.58 ± 1.459 for the "Novice" group, 21.67 ± 0.5578 for the
262 "Experienced" group, and 16.80 ± 0.8667 for the "Intermediate" group.

263 Regarding the *Respect of tissue* criterion, the "Intermediate" group gets an average of 3.0 ± 0.326 , the
264 "Novice" group gets 3.8 ± 0.1333 , and the "Experienced" group gets the best average with $4.333 \pm$
265 0.2108 . The differences are significant between the "Experienced" and "Intermediate" groups and
266 between the "Experienced" and "Novice" groups.

267 In the *Economy of movement* criterion the "Novice" group gets an average of 2.917 ± 0.358 , the
268 "Intermediate" group gets a higher score with 3.20 ± 0.24 , and the "Experienced" Group stands out
269 with a better average of 4.333 ± 0.2108 .

270 Average scores for the *Instrument handling* criterion ranges from 2.667 ± 0.284 for the group
271 "Novice" to 4.333 ± 0.2108 for the group "Experienced", the "Intermediate" group getting an average
272 score of $3,100 \pm 0, 2769$.

273 *Flow of operation* that also was objectively assessed by the sensors is denoted by an average
274 subjective assessment of 3.083 ± 0.3128 for the "Novice" group, 3.20 ± 0.200 for the "Intermediate"
275 group and 4.333 ± 0.2108 for the "Experienced" group.

276 Finally, the *Knowledge of specific* procedure criterion is estimated to average 2.917 ± 0.313 for the
277 "Novice" group, 3.50 ± 0.3073 for the "Intermediate" group, and 4.333 ± 0.211 for the "Experienced"
278 group.

279 3.2.2. Validation of the accelerometer as a differentiation tool

280 As previously explained, in order to validate the results it was first necessary to identify whether the
281 accelerometer data could be used to distinguish between the expert and novice subjects. The
282 following hypotheses were tested:

283 H1: Maximal accelerations in X, Y, Z axes and standard deviations are minimal and inversely related
284 to the subject's experience.

285 H2: The cumulative acceleration during the procedure is inversely related to subject experience.

286 H3: Total procedure time is inversely related to subject experience (least time denotes more
287 experience).

288 Table 5 shows the parameters that were calculated from the accelerometer data to be used in the
289 analysis. The mean, maximal and deviation parameters corresponds to statistical features and the

290 others are domain specific features to motion analysis. The path length feature in particular has been
 291 shown to be an important feature in surgical skill assessment (see Table 1 and Table 2). It is defined as
 292 $Path\ Length = \sum_{i=0}^{n-1} |p_{i+1} - p_i|$; since acceleration is the variation of speed over time, it is
 293 necessary to proceed to a double integration of the value in order to obtain the position eq.1 $P_t =$
 294 $\int \int a (dt) dt$. In this work we used the trapezoidal rule for the numerical integration with the data
 295 from the sensor.

296 **Table 5. Movement analysis parameter definition.**

Parameter	Description	Formula
<i>Acceleration</i>		
Resulting acceleration (a)	Calculated using the Pythagoras theorem, where x, y, z represent the acceleration on each axis.	$a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
Total resulting acceleration (AT)	The addition of the resulting accelerations.	$AT = \sum_{i=0}^n a_i$
Maximal acceleration x-axis, y-axis, z-axis	The maximal acceleration in each axis i ($i = x, y, z$)	$a_{max\ i} = \max\{a_i\}$
Mean resulting acceleration ($\bar{a}$)	The mean of the resulting acceleration	$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n a_i$
Mean acceleration x-axis, y-axis, z-axis	The mean acceleration on each axis i ($i = x, y, z$)	$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$
Standard deviation acceleration x-axis, y-axis, z-axis ($\sigma_{a,i}$)	The standard deviation for the acceleration on each axis i ($i = x, y, z$)	$\sigma_{a,i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_i - \bar{a}_i)^2}{N}}$
Path Length	The cumulative hand distance based on tool movement during the intervention.	$Path\ Length = \sum_{i=0}^{n-1} p_{i+1} - p_i $
Time	Calculated using the motion sensor from the moment the hands leave the initial position until the procedure is completed and the hands return to the initial position (flat hands on the table). Sensor frequency is 128 Hz.	

297

298 Table 6 summarizes the data analysis results. Results are presented as Mean (M) $\pm$ Standard Deviation
 299 (SD). For the maximal acceleration, mean acceleration, SD acceleration no significant difference was
 300 found among the groups except for the SD acceleration x-axis for the dominant hand. However, there
 301 was a more significant difference between the groups for the Total resulting acceleration, the Total
 302 time and Total path length for both hands.

303 **Table 6. Data analysis results.**

	Expert	Intermediate	Novice	P
	M $\pm$ SD	M $\pm$ SD	M $\pm$ SD	
Total Time	545.524 $\pm$ 100.263	610.395 $\pm$ 148.388	841.609 $\pm$ 257.819	0.006 *

Dominant hand				
Max. Acceleration x-axis	0.922 ± 0.320	0.838 ± 0.268	0.962 ± 0.121	0.516
Max. Acceleration y-axis	0.665 ± 0.269	1.210 ± 0.707	1.080 ± 0.540	0.152
Max. Acceleration z-axis	1.187 ± 0.103	1.038 ± 0.239	1.096 ± 0.274	0.379
SD Acceleration x-axis	0.212 ± 0.076	0.229 ± 0.047	0.190 ± 0.039	0.277
SD Acceleration y-axis	0.270 ± 0.057	0.294 ± 0.065	0.311 ± 0.062	0.459
SD Acceleration z-axis	0.350 ± 0.041	0.376 ± 0.046	0.354 ± 0.078	0.504
Mean Acceleration	9.580 ± 0.028	9.627 ± 0.093	9.610 ± 0.037	0.370
Total Path Length	45.7 ± 23	85.7 ± 64.1	141 ± 110.3	0.058**
Total resulting Acceleration	668940.8 ± 122743.6	751934.7 ± 181201.9	1035054.1 ± 316235.4	0.005*
Non-dominant hand				
Max. Acceleration x-axis	0.784 ± 0.129	4.963 ± 15.623	0.883 ± 0.214	0.609
Max. Acceleration y-axis	1.944 ± 0.289	1.565 ± 0.512	2.065 ± 0.618	0.072
Max. Acceleration z-axis	1.185 ± 0.214	5.563 ± 16.775	1.238 ± 0.401	0.620
SD Acceleration x-axis	0.168 ± 0.038	0.236 ± 0.072	0.191 ± 0.042	0.041
SD Acceleration y-axis	0.241 ± 0.052	0.274 ± 0.086	0.294 ± 0.064	0.384
SD Acceleration z-axis	0.402 ± 0.039	0.403 ± 0.087	0.381 ± 0.073	0.787
Mean Acceleration	9.885 ± 0.079	9.888 ± 0.102	9.920 ± 0.095	0.708
Total Path Length	45.2 ± 16.8	72 ± 65.9	138.1 ± 148.9	0.13***
Total resulting Acceleration	689721.1 ± 123852.3	771648.4 ± 184466.6	1070392.7 ± 334148.7	0.005*
Data are presented as Mean ± Standard deviation (M ± SD)				
* $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.1$ Statistically significant				

304

305 In order to verify the relationship between the variables that presented a significant difference (Total
306 time, Total resulting acceleration and Total path length) an analysis using an HSD Tukey test was
307 performed.

308 The Total time factor presented a significant effect with the experience level ($p = 0.006099$). The
309 “experienced” group ($M = 545.52 \pm 100.2$ s) performs the exercise in less time than the
310 “intermediate” ($M = 610.39 \pm 148.38$ s) and “novice” group ($M = 841.60 \pm 257.81$ s). The analysis
311 shows that the more experienced the candidate, the less time is required to perform the intervention in
312 validation of the H3 hypothesis. Tukey’s test showed that there is a significant difference between the
313 “experienced” and the “novice” groups. Figure 2 presents the repartition of the data between total
314 time and experience level.

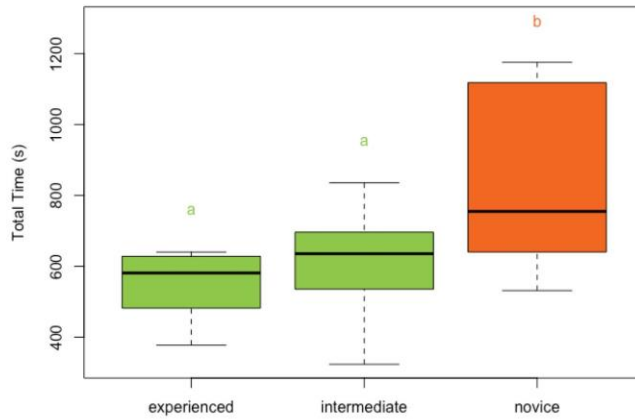


Figure 2. Total time per experience level.

In the case of the Total resulting acceleration, the statistical analysis showed that there was a significant relationship between the experience levels in each hand ($p=0.005$) for the dominant hand and ($p=0.005$) for the non-dominant hand. There is almost no difference between the hands; the “experienced” group presented a lower total acceleration than the other groups. This validates the H2 hypothesis that the least experienced participant has the highest total acceleration. Figure 3 shows the relationship between the total resulting acceleration and the experience levels. The Tukey test showed that there is an important difference between experienced and novice groups.

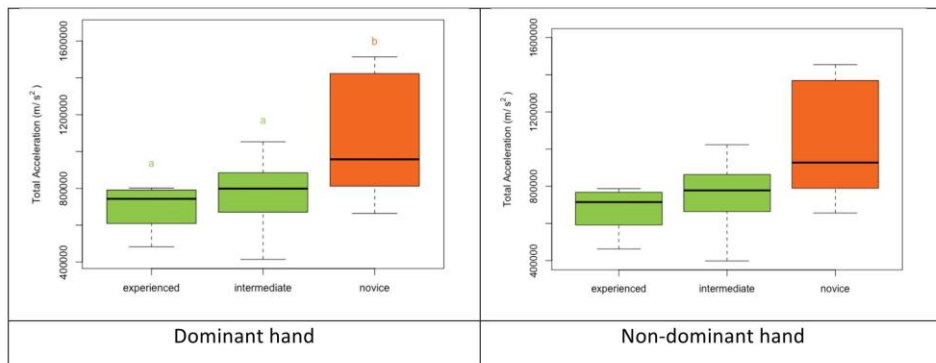


Figure 3. Total acceleration per experience group for both hands.

Finally the Total path length showed a significant difference ($p=0.058$) between experience levels for the dominant hand sensors. The “experienced” group presented a small Total length with the hands than the “novice” group this implies as in the literature that experienced practitioners had a better economy of movement. A Tukey analysis was performed; Figure 4 presents the groups’ values, showing that there is an important difference that allows us to distinguish between “novice” and “experienced” groups.

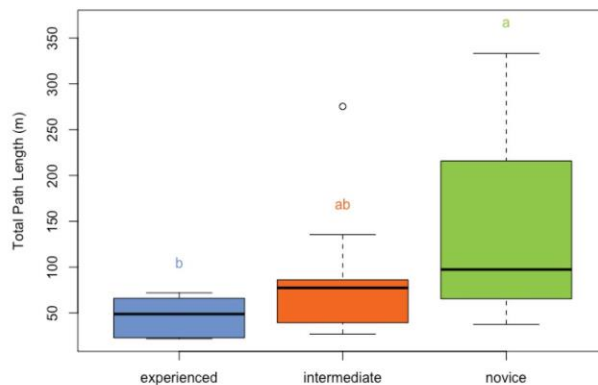


Figure 4. Total length distribution per experience level for dominant hand.

The analysis allowed us to validate the H2 and H3 hypotheses, but there was no significant difference between the maximal accelerations for each group, so there was insufficient evidence to validate the H1 hypothesis.

3.2.3. Test of the accelerometer as an objective technical skills assessment tool

Once the relationship between the motion sensor measurements and the levels of expertise had been validated, we proceeded to use those measurements as part of a skill assessment. The traditional assessment is based on the evaluation grid shown in Table 4. According to the literature, two of these five criteria can be assessed using motion analysis features (Datta et al., 2001; Godfrey, Conway, Meagher, & ÓLaighin, 2008; Sánchez et al., 2014).

The *Time and motion* criterion has been shown to correlate with the experience of the subject (cf. Table 2 metrics). According to its definition, it corresponds to the *total path length* of hand movement during the procedure.

The second criterion corresponds to the *flow of operation*; it has been shown that the number of movements and *total acceleration* are significant differentiation factors between groups (Saleh, 2008).

3.2.4. Objective grade generation

In order to compare the two assessment methods, the results obtained by the motion sensor were expressed in terms of an assessment grade (1-5). For this a five-level interval was created for each evaluated criterion (Total resulting acceleration and Path Length); the maximum and minimum values measured are used to create the intervals and then each participant is assigned a grade for each criterion. Finally, each participant's overall assessment grade (cf. Table A.7) was obtained by replacing the two criteria motion sensor grades with the evaluator grades, that is to say that the new grade in the mixed method is composed of the three grades by the evaluator (*Respect of tissue*, *Instrument handling*, and *Knowledge of specific procedure*) and the two grades generated with the motion sensors (*flow of operation* and *time and motion*). The grades corresponding to the Flow of operation criteria range from 4.43 ± 0.53 for the "experienced" group, 3.71 ± 0.72 for the "intermediate" group, and 2.50 ± 1.30 for the "novice" group. For the Time and motion criteria the grades range from 5 ± 0 for the "experienced" group, 4.50 ± 1 for the "intermediate" group, and 3.75 ± 1.75 for the "novice" group.

4. Discussion

4.1. Comparison between the evaluator only assessment and the mixed assessment (motion sensor included)

Results of both assessment methods were compared (cf. Table A.7). Figure 5 presents the results for each participant's grade obtained by each of the two methods (only the grades with the dominant hand are illustrated). The red dots represent the evaluator's assessment notes, and the blue dots the proposed mixed method using the motion sensors.

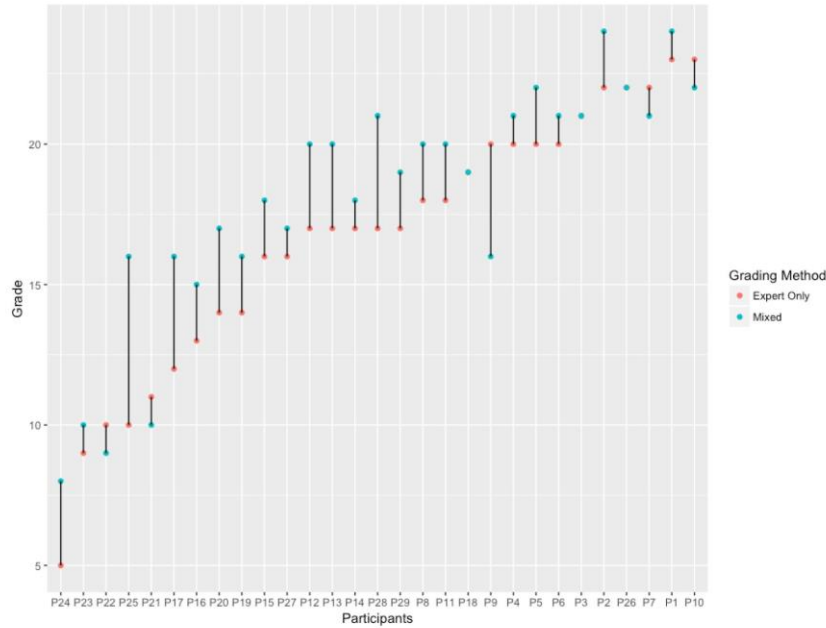


Figure 5. Evaluator and mixed assessment grades per participant.

We can observe that the grades follow the same trend, with only a few cases having a big dispersion. In comparison with the expert only evaluation, the mixed method has a precision of 72.4%. It is interesting to note that there are some participants who were initially declared in one category but in the end performed differently; in this case the grades from the mixed method and the evaluator were consistent. For example, a participant was declared as experienced but performed very poorly and was judged by the expert and the mixed method as a novice. We established that this person said it felt uncomfortable with the use of the tool in the experiment because he commonly used another type of tool.

In order to analyze the correlation among the assessment criteria a principal component analysis, PCA, was applied. Figure 6 presents a biplot chart; we can observe that all the criteria and, more importantly, the Evaluator only grade (Total) and the Mixed grade (T.Note.Capteurs) follow the same direction. Expert and intermediate participants are mostly located in the left quadrants, with the exception of the expert who performed badly. The novice categories are dispersed in the right quadrant.

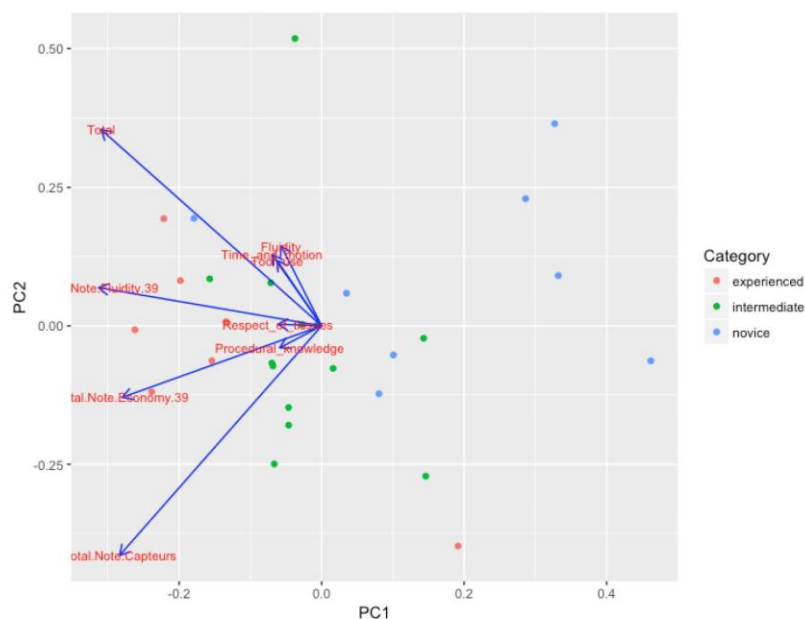


Figure 6. Principal Component Analysis biplot chart.

4.2. General discussion

Mastery of gestures and knowledge of procedures are essential to ensure maximum efficiency and safety for the patient in oral surgery and other surgical disciplines. The evaluation of skills for surgical procedures in dentistry is frequently based on a subjective assessment using qualitative criteria. To overcome this problem, various means can be implemented, such as using motion sensors. In laparoscopic surgery, sensors were successfully used to differentiate between several groups of practitioners (Salamo et al., 2014; Sánchez et al., 2014), and development of simulators with haptic technology also allows us to consider an objective assessment of future surgeons' skills (Botden, Torab, Buzink, & Jakimowicz, 2008; Dehabadi, Fernando, & Berlingieri, 2014; Joseph et al., 2014; Uemura et al., 2015). Other methods, such as tracking eyes, were also able to differentiate practitioners of different levels (Richstone et al., 2010). Finally, the use of grid corrections such as those used in the OSCE (objective structured clinical evaluation) reduces subjectivity without deleting it completely (Hanson et al., 2010; Niitsu et al., 2013; Scott et al., 2001).

The objective assessment of skills is essential in seeking certification of gesture with the ultimate goal of increasing patient safety (Grigoresco, Mignon, & Tesniere, 2014). Like laparoscopic surgery and robotic surgery, skills in oral surgery must be considered from the angle of economy of movement, which reflects a certain skill of the operator. In this study we were able to differentiate between experts and novices through the subjective evaluation of the procedure videos.

The different criteria used allowed us to classify novices and experienced practitioners. In accordance with what has been shown in robotic surgery (Perrenot et al., 2012), the group of experienced practitioners showed significantly greater economy of movement than the novice group. It therefore seems interesting to find a way to measure this parameter objectively. This is what was done in this study with the use of motion sensors. The results obtained, thanks to the use of sensors, allowed us to see a marked improvement in the experienced group compared to other groups.

We also wanted to objectively define the fluidity of the operation that characterizes the ability of the practitioner. To do this we calculated the total resulting acceleration during the procedure measured by the sensors. It was shown that the mixed grades provided by the sensors are as good as the grades provided by the evaluator.

In this study we used sensors attached to participants' wrists to avoid hindering their performance during the test. Participants did not report any difficulties with the placement of the sensors.

This study is not without limitations. Indeed, the sample size is limited to generalize the results. The model parameters need to be modified and adapted if the procedure changes. The calculation of the discrete levels is dependent on the size and performance of the groups in order to translate the measurements recorded by the motion sensors into their equivalent grades.

While an effort to keep the conditions of the test as standard as possible was made, the use of wet models implies a deterioration of the model with each procedure performed. The use of a standard model (synthetic model for example) validated for each participant could help reduce the variance that might be introduced by the manipulation of the animal model.

427

5. Conclusion

The use of recording sensors to objectively assess performance parameters should eventually make it possible to certify the skills of future practitioners.

In dentistry, as in other medical fields, it is necessary to identify the relevant criteria and then find a simple way to measure these criteria. Here we have studied the value and usability of a motion sensor system, allowing us to assess the economy of movement and flow of operation criteria. However, other criteria and sensors should be considered in order to achieve a completely objective evaluation. The establishment of such a system could enable self-assessment that would be relevant for students.

By combining these results with an image analysis, such as that proposed by Frischknecht (Frischknecht et al., 2013), a complete objective assessment of basic skills in oral surgery could be considered.

6. Acknowledgment

The authors would like to thank all the students and surgeons that participated in the study. In particular, the authors are grateful to the engineering students that helped run the experiments: Jessy Vincente, Maud Turin, Noel Vignacq, Adrian Carpinteiro, and Paola Romo. We would also like to thanks Fabio Cruz for its help debugging our data analysis scripts.

7. Appendix A. Participants' assessment notes for expert only and mixed methods

Table A.7. Participants' assessment with expert only and mixed method.

CODE	Category	Respect of tissues	Time and motion	Tool use	Fluidity	Procedural knowledge	Total grade (expert only)	Fluidity grade (proposed)	Economy grade (proposed)	Total grade (mixed)
1	experienced	5	5	4	4	5	23	5	5	24
10	experienced	4	5	5	5	4	23	4	5	22
2	experienced	5	4	4	4	5	22	5	5	24
26	experienced	4	4	5	5	4	22	4	5	22
7	novice	4	5	4	5	4	22	4	5	21
3	intermediate	4	4	4	4	5	21	4	4	21

5	experienced	4	4	4	4	4	20	5	5	22
6	experienced	4	4	4	4	4	20	4	5	21
9	intermediate	4	4	4	4	4	20	3	1	16
4	intermediate	4	4	4	4	4	20	4	5	21
18	intermediate	4	4	3	4	4	19	3	5	19
8	intermediate	4	3	4	4	3	18	4	5	20
11	intermediate	4	4	3	3	4	18	4	5	20
12	intermediate	4	3	4	3	3	17	4	5	20
13	intermediate	4	3	3	3	4	17	4	5	20
14	intermediate	4	3	3	3	4	17	3	4	18
28	intermediate	4	3	3	3	4	17	5	5	21
29	intermediate	4	4	3	4	2	17	5	5	19
15	intermediate	4	3	3	3	3	16	3	5	18
27	novice	3	4	3	3	3	16	3	5	17
20	novice	3	3	2	3	3	14	4	5	17
19	novice	3	3	2	3	3	14	3	5	16
16	intermediate	3	2	3	3	2	13	3	4	15
17	intermediate	3	2	1	2	4	12	3	5	16
21	novice	3	1	2	2	3	11	1	1	10
22	novice	2	2	2	3	1	10	3	1	9
25	experienced	2	1	2	2	3	10	4	5	16
23	novice	1	2	2	2	2	9	1	4	10
24	novice	1	1	1	1	1	5	1	4	8

8. References

- Acton, R. D. (2015). The Evolving Role of Simulation in Teaching Surgery in Undergraduate Medical Education. *Surgical Clinics of North America*, 95(4), 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.suc.2015.04.001>
- Aggarwal, R., Grantcharov, T., Moorthy, K., Milland, T., Papasavas, P., Dosis, A., ... Darzi, A. (2007). An Evaluation of the Feasibility, Validity, and Reliability of Laparoscopic Skills Assessment in the Operating Room. *Annals of Surgery*, 245(6), 992–999. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000262780.17950.e5>
- Bann, S. D., Khan, M. S., & Darzi, A. W. (2003). Measurement of Surgical Dexterity Using Motion Analysis of Simple Bench Tasks. *World Journal of Surgery*, 27(4), 390–394. <https://doi.org/10.1007/s00268-002-6769-7>
- Bann, S., Darzi, A., Munz, Y., Kumar, B. D., & Moorthy, K. (2004). Laparoscopic virtual reality and box trainers: is one superior to the other? *Surgical Endoscopy*, 18(3), 485–494. <https://doi.org/10.1007/s00464-003-9043-7>
- Botden, S. M. B. I., Torab, F., Buzink, S. N., & Jakimowicz, J. J. (2008). The importance of haptic feedback in laparoscopic suturing training and the additive value of virtual reality simulation. *Surgical Endoscopy*, 22(5), 1214–1222. <https://doi.org/10.1007/s00464-007-9589-x>
- Brydges, R., Classen, R., Larmer, J., Xeroulis, G., & Dubrowski, A. (2006). Computer-assisted assessment of one-handed knot tying skills performed within various contexts: a construct validity study. *The American Journal of Surgery*, 192(1), 109–113. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2005.11.014>
- Brydges, R., Sidhu, R., Park, J., & Dubrowski, A. (2007). Construct validity of computer-assisted assessment: quantification of movement processes during a vascular anastomosis on a live porcine model. *The American Journal of Surgery*, 193(4), 523–529. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2006.08.076>
- D'Angelo, A. L. D., Rutherford, D. N., Ray, R. D., Laufer, S., Kwan, C., Cohen, E. R., ... Pugh, C. M. (2015).

469 Idle time: An underdeveloped performance metric for assessing surgical skill. *American Journal of*
470 *Surgery*, 209(4), 645–651. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2014.12.013>

471 Datta, V., Chang, A., Mackay, S., & Darzi, A. (2002). The relationship between motion analysis and surgical
472 technical assessments. *The American Journal of Surgery*, 184(1), 70–73. [https://doi.org/10.1016/S0002-](https://doi.org/10.1016/S0002-9610(02)00891-7)
473 9610(02)00891-7

474 Datta, V., Mackay, S., Mandalia, M., & Darzi, A. (2001). The use of electromagnetic motion tracking analysis
475 to objectively measure open surgical skill in the laboratory-based model1 1No competing interests
476 declared. *Journal of the American College of Surgeons*, 193(5), 479–485. [https://doi.org/10.1016/S1072-](https://doi.org/10.1016/S1072-7515(01)01041-9)
477 7515(01)01041-9

478 Dehabadi, M., Fernando, B., & Berlingieri, P. (2014). The use of simulation in the acquisition of laparoscopic
479 suturing skills. *International Journal of Surgery*, 12(4), 258–268.
480 <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2014.01.022>

481 Fitts, P., & Posner, M. (1967). *Human performance*. Belmont, CA: Brooks/Cole.

482 Fried, G. M., & Feldman, L. S. (2008). Objective assessment of technical performance. *World Journal of*
483 *Surgery*, 32(2), 156–160. <https://doi.org/10.1007/s00268-007-9143-y>

484 Frischknecht, A. C., Kasten, S. J., Hamstra, S. J., Perkins, N. C., Gillespie, R. B., Armstrong, T. J., & Minter, R.
485 M. (2013). The Objective Assessment of Experts' and Novices' Suturing Skills Using An Image Analysis
486 Program. *Academic Medicine*, 88(2), 260–264. <https://doi.org/10.1097/ACM.0b013e31827c3411>

487 Godfrey, A., Conway, R., Meagher, D., & ÓLaighin, G. (2008). Direct measurement of human movement by
488 accelerometry. *Medical Engineering and Physics*, 30(10), 1364–1386.
489 <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.09.005>

490 Grigoresco, B., Mignon, A., & Tesniere, A. (2014). La simulation en santé, de la théorie à la pratique. *La Revue*
491 *de L'infirmiere*, 63(204), 17–19.

492 Hanson, C., Mossey, P., & Macluskey, M. (2010). The assessment of suturing skills of dental undergraduates.
493 *European Journal of Dental Education: Official Journal of the Association for Dental Education in*
494 *Europe*, 14(2), 113–117. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0579.2009.00600.x>

495 Joseph, D., Jehl, J., Maureira, P., Perrenot, C., Miller, N., Bravetti, P., ... Tran, N. (2014). Relative Contribution
496 of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology. *BioMed Research International*,
497 2014, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/413951>

498 Mason, J. D., Ansell, J., Warren, N., & Torkington, J. (2013). Is motion analysis a valid tool for assessing
499 laparoscopic skill? *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*.
500 <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2631-7>

501 Moorthy, K., Munz, Y., Dosis, A., Bello, F., Chang, A., & Darzi, A. (2004). Bimodal assessment of
502 laparoscopic suturing skills: Construct and concurrent validity. *Surgical Endoscopy*, 18(11), 1608–1612.
503 <https://doi.org/10.1007/s00464-003-9312-5>

504 Morris, B. (2005). Robotic surgery: applications, limitations, and impact on surgical education. *MedGenMed :*
505 *Medscape General Medicine*, 7(3), 72.

506 Niitsu, H., Hirabayashi, N., Yoshimitsu, M., Mimura, T., Taomoto, J., Sugiyama, Y., ... Takiyama, W. (2013).
507 Using the Objective Structured Assessment of Technical Skills (OSATS) global rating scale to evaluate
508 the skills of surgical trainees in the operating room. *Surgery Today*, 43(3), 271–275.
509 <https://doi.org/10.1007/s00595-012-0313-7>

510 Oropesa, I., Sánchez-González, P., Lamata, P., Chmarra, M. K., Pagador, J. B., Sánchez-Margallo, J. A., ...
511 Gómez, E. J. (2011). Methods and Tools for Objective Assessment of Psychomotor Skills in Laparoscopic
512 Surgery. *Journal of Surgical Research*, 171(1), e81–e95. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.06.034>

513 Pellegrini, C. A. (2012). Surgical education in the United States 2010: developing intellectual, technical and
514 human values. *Updates in Surgery*, 64(1), 1–3. <https://doi.org/10.1007/s13304-011-0113-4>

515 Perrenot, C., Perez, M., Tran, N., Jehl, J.-P., Felblinger, J., Bresler, L., & Hubert, J. (2012). The virtual reality
516 simulator dV-Trainer® is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surgical Endoscopy*, 26(9),

2587–2593. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2237-0>

Ponton-Carss, A., Kortbeek, J. B., & Ma, I. W. Y. (2016). Assessment of technical and nontechnical skills in surgical residents. *The American Journal of Surgery*, 212(5), 1011–1019. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2016.03.005>

Reznick, R. K., & MacRae, H. (2006). Teaching Surgical Skills — Changes in the Wind. *New England Journal of Medicine*, 355(25), 2664–2669. <https://doi.org/10.1056/NEJMr054785>

Reznick, R., Regehr, G., MacRae, H., Martin, J., & McCulloch, W. (1997). Testing technical skill via an innovative “bench station” examination. *American Journal of Surgery*, 173(3), 226–230. [https://doi.org/10.1016/S0002-9610\(97\)89597-9](https://doi.org/10.1016/S0002-9610(97)89597-9)

Richstone, L., Schwartz, M. J., Seideman, C., Cadeddu, J., Marshall, S., & Kavoussi, L. R. (2010). Eye Metrics as an Objective Assessment of Surgical Skill. *Annals of Surgery*, 252(1), 177–182. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e3181e464fb>

Salamo, O., Ismayel, A. S., Rodríguez, O., Sánchez, R., Pena, R., & Báez, V. & M. (2014). Evaluation of surgical skills for laparoscopic surgery: study of movement patterns by means of accelerometers. *VITAE Academia Biomédica Digital*, 0(58), 4945.

Saleh, G. M. (2008). Motion Analysis as a Tool for the Evaluation of Oculoplastic Surgical Skill. *Archives of Ophthalmology*, 126(2), 213. <https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2007.62>

Sánchez, A., Rodríguez, O., Sánchez, R., Benítez, G., Pena, R., Salamo, O., & Baez, V. (2014). Laparoscopic Surgery Skills Evaluation: Analysis Based on Accelerometers. *JSLs: Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons*, 18(4), e2014.00234. <https://doi.org/10.4293/JSLs.2014.00234>

Scott, B. J., Evans, D. J., Drummond, J. R., Mossey, P. A., & Stirrups, D. R. (2001). An investigation into the use of a structured clinical operative test for the assessment of a clinical skill. *European Journal of Dental Education : Official Journal of the Association for Dental Education in Europe*, 5(1), 31–7.

Shaharan, S. (2014). Evaluation of surgical training in the era of simulation. *World Journal of Gastrointestinal Endoscopy*, 6(9), 436. <https://doi.org/10.4253/wjge.v6.i9.436>

Smith, S. G. T., Torkington, J., Brown, T. J., Taffinder, N. J., & Darzi, A. (2002). Motion analysis. *Surgical Endoscopy*, 16(4), 640–645. <https://doi.org/10.1007/s004640080081>

Uemura, M., Yamashita, M., Tomikawa, M., Obata, S., Souzaki, R., Ieiri, S., ... Hashizume, M. (2015). Objective assessment of the suture ligature method for the laparoscopic intestinal anastomosis model using a new computerized system. *Surgical Endoscopy*, 29(2), 444–452. <https://doi.org/10.1007/s00464-014-3681-9>

van Hove, P. D., Tuijthof, G. J. M., Verdaasdonk, E. G. G., Stassen, L. P. S., & Dankelman, J. (2010). Objective assessment of technical surgical skills. *British Journal of Surgery*, 97(7), 972–987. <https://doi.org/10.1002/bjs.7115>

III. Discussion

III.1. La contribution des simulateurs dans la formation en Odontologie

III.1.1. En Implantologie

Les simulateurs numériques avec des bras à retour de force sont en plein développement depuis le milieu des années 2000^{38,73}. Les premières études s'intéressaient au développement de l'interface graphique et du bras à retour de force (Phantom®), identique à celui utilisé dans le simulateur Virteasy®. Des études comme Steinberg *et coll.* (2007)⁶⁵ ont évalué l'utilisation d'un simulateur orienté plus spécifiquement dans le traitement parodontal et plus particulièrement le sondage et le surfaçage radiculaire. A l'époque, le rendu graphique de ce simulateur, suffisamment réaliste pour les dents et les instruments, était jugé peu convaincant pour la gencive. Cependant, le fort potentiel pédagogique de ces nouveaux instruments a permis d'esquisser de nouvelles bases pour les autres investigations.

En 2010, Suebnukarn *et coll.*⁷⁴ ont pu conclure que l'utilisation d'un bras à retour de force augmentait la performance des étudiants dans la réalisation d'un exercice de base en dentisterie. Ce point était déjà mentionné dans une étude antérieure menée par Buchanan *et coll.* en 2004 qui démontrait que les étudiants entraînés sur ces dispositifs amélioraient très significativement leur courbe d'apprentissage. Plus tard en 2007, une étude menée par Sternberg *et coll.*⁶³ a pu montrer l'intérêt du Voxel man®, un simulateur « haptic », dans l'apprentissage de l'apicectomie, un acte de chirurgie endodontique consistant à effectuer un curetage apical des lésions kystiques. En 2010, dans une autre étude, Pohlenz *et coll.*⁷⁵ ont conclu que l'entraînement sur ce type de simulateur permettait d'obtenir de meilleurs scores en limitant le risque de lésions nerveuses et vasculaires.

Nous avons essayé au cours de notre étude d'apprécier l'intérêt d'un nouveau simulateur, le Virteasy® comme outil pédagogique en chirurgie implantaire.

Nous avons tout d'abord reproduit un exercice du simulateur dans le monde réel par la réalisation d'un forage dans un modèle en résine afin de déterminer la validité de construction (capacité de différencier un novice d'un expert). Notre modèle a été efficace car il a permis de faire ressortir les différences d'approche et de capacité opératoire des trois populations étudiées *i.e.* les novices, les simulateurs et les experts.

Au cours de cette évaluation, les différences entre les experts et les novices étaient très évidentes notamment pour les paramètres d'appréciation d'angulation (vestibulo-linguale et mésio-distale), de centrage de l'implant et de perforation. Concernant l'indication angulaire, l'approche mésio-distale (avant en arrière), certainement plus facile à apprécier, montrait une progression plus régulière vers une angulation parfaite. Le groupe « Novice » était caractérisé par une grande hétérogénéité dans les premières performances obtenues. La simulation permettait de réduire l'écart entre les apprenants suggérant que les exercices et l'entraînement proposés produisaient un impact favorable dans l'exécution de ce geste. L'appréciation de l'angulation vestibulo-linguale était moins évidente à première vue. Alors que l'on s'attendait à voir une différence d'angulation vestibulo-linguale proche de 0° chez les experts, ces derniers ont choisi majoritairement de positionner l'implant avec une angulation de l'intérieur vers l'extérieur et de haut en bas avec la pointe de l'implant dirigé vers le côté vestibulaire. Les deux autres groupes ont procédé à l'inverse. En fait, au lieu de suivre simplement les énoncées de l'exercice, il semblerait que l'expérience clinique des experts leur ait fait préférer une position d'angulation leur permettant ainsi d'éviter de perforer la corticale linguale beaucoup plus fine. La bonne gestion de cet axe est primordiale pour un positionnement optimal de l'implant particulièrement dans cet exercice où l'épaisseur de crête linguale est limitée. De ce fait, la survenue des accidents était plus rare et avec des conséquences moins dramatiques ⁷⁶. Les plus jeunes confrères, en dehors du fait que la réalisation de l'inclinaison n'était pas encore optimale, ne pouvaient connaître cette stratégie opérationnelle. Ceci pourrait expliquer le taux élevé de perforations observé dans cette série. Suite à cela nous avons entrepris en collaboration avec le concepteur du simulateur d'améliorer les critères d'expertise sur le simulateur afin de rendre la progression encore plus évidente et attractive grâce à une refonte du module d'évaluation. Cela soulignait également, à côté de cette nouvelle stratégie pédagogique reposant sur la simulation, la place importante de l'expérience acquise et de la transmission entre les pairs.

L'appréciation de la profondeur représentait un autre point crucial de l'efficacité en implantologie. Dans notre étude, si la moyenne de la profondeur de forage ne différait pas de

façon significative, l'expertise et l'entraînement au simulateur ont permis de resserrer les variabilités interindividuelles, une des conditions de reproductibilité qui peut s'avérer cruciale pour une démarche vers la certification des gestes et la sécurité des patients. A ce titre, les travaux d'Ioannou *et coll.* en 2010^{77,78}, s'appuyant sur les paramètres caractérisant un forage réalisé par des étudiants et par des experts, ont été éclairants. Pour ces auteurs, une bonne maîtrise de la force exercée permettait de réaliser un forage optimal et ceci, de façon plus rapide par rapport aux novices. Dans notre étude, bien que nous n'ayons pas pu étudier le paramètre de la force appliquée, le faible écart entre les experts concernant la profondeur était en accord avec les résultats de cette équipe. Le point qui semblait discordant ici pouvait être le temps total fourni pour accomplir le geste. En effet, si les trois groupes ont mis à peu près le même temps (environ 300 secondes) pour terminer l'exercice, une très grande variabilité est observée chez les experts. Ce résultat semble être en désaccord avec ce qu'on peut usuellement documenter dans la formation traditionnelle et/ou innovante^{74,77,78}. Dans notre étude, une grande partie de cette variabilité pourrait être imputable à la grande différence de recul parmi les experts. En effet, une analyse plus fine de ce groupe a permis de montrer que les experts qui avaient plus de 200 implants à leur actif présentaient un temps de forage beaucoup plus rapide (249 ± 60 sec) que celui documenté chez les « journeyman » (moins de 60 implants ; 450 ± 242 sec). Peut-être faudrait-il voir également dans ces résultats un manque d'assurance de la part de nos jeunes praticiens devant une double comparaison des résultats, celle avec leur « maîtres » et celle surtout avec les plus jeunes plus ou moins bien entraînés ?

Notre étude a permis de mettre en exergue la contribution pédagogique relative du simulateur dans l'apprentissage des gestes opératoires de l'implantologie. En effet, les différents paramètres étudiés s'amélioraient dans le temps. Comme cela a été déjà démontré et rappelé précédemment, les jeunes ayant bénéficié d'un parcours de simulation ont présenté un meilleur résultat que les novices lors de l'exercice de forage. Ici, l'analyse de leur parcours sur le Virteasy® a révélé quelques points d'amélioration dans les scénarii pédagogiques et dans le rôle potentiel de l'équipe d'accompagnateurs/tuteurs.

Tout d'abord, les exercices nécessitant un choix et une visualisation et/ou un repérage spatial demanderaient une aide plus soutenue. En effet, la performance des participants stagnait voire diminuait lorsque l'aide de repérage d'angulation était retirée au bout du 4^{ème} essai. Globalement, les paramètres s'amélioraient mais il faudrait certainement envisager un nombre d'essais plus important afin de déterminer le temps nécessaire avant d'obtenir des résultats

répétables dans le temps et ceci, sans aide numérique. On peut également considérer que la formation seule par la simulation ne suffit pas à potentialiser rapidement la courbe d'apprentissage. D'autres moyens pédagogiques pourraient accentuer l'amélioration attendue. Nous avons déjà démontré lors de nos études récentes sur la simulation robotique chirurgicale que l'apport du briefing/debriefing ⁷⁹ lors d'un exercice au simulateur Mimic® en microchirurgie ⁸⁰ potentialisait significativement la courbe d'apprentissage des apprenants en dépassant le seuil d'acquisition obtenu uniquement par l'apprentissage autonome. A l'instar de ce qu'on peut observer dans la pratique d'aviation civile et/ou militaire, le rapport de l'HAS en 2012 rappelle et souligne une fois de plus le rôle primordial des séances de briefing/debriefing dans l'enseignement réalisé par simulation. En simulation, le débriefing peut agir comme une sorte de « feedback » permettant la transmission active d'informations correctives basées sur l'évaluation d'une action à l'apprenant. Il renforce ainsi une réflexion guidée ou facilitée durant un cycle d'apprentissage expérientiel ⁸¹ et surtout, là encore, un rôle nécessaire du compagnonnage actif.

La progression de l'acquisition progressive de compétences par les étudiants lors d'une courte formation par simulation haptique est le premier enseignement de nos expérimentations.

Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'amélioration du **module d'évaluation** permettant d'apporter à l'apprenant des informations pertinentes sur la qualité des préparations réalisées.

Les discussions menées par la suite avec les étudiants et le fabricant nous ont permis de proposer des améliorations concrètes afin de le rendre le simulateur (Virteasy®) plus didactique.

Les critères objectifs d'évaluation sont désormais bien mis en avant et complétés par l'imagerie 3D.

Nous avons travaillé avec le concepteur sur la façon de fournir les informations aux participants.

Dans la première version, les critères étaient présentés de façon peu claire en anglais dans une petite fenêtre. Nous avons souhaité que, pour chaque forage, l'apprenant puisse visualiser facilement les erreurs à corriger avec une visualisation du travail réalisé.

Nous avons regroupé les critères en 5 colonnes : chaque critère s’affiche en rouge ou en vert en fonction de la réussite ou de l’échec.

-Critères de centrage, pour lequel on différencie le sens vestibulo-lingual et mesio-distal.

-Critères d’angulation, pour lequel on différencie le sens vestibulo-lingual et mesio-distal.

-La profondeur de forage.

-Perforation, critère binaire (oui ou non).

-Le temps, pour lequel on différencie le temps nécessaire pour réaliser l’exercice et le temps de forage effectif.

Au-dessus de ces critères s’affichent les différentes vues des coupes tomodensitométriques (dans les différents plans) avec en bleu le forage attendu et en rouge (incorrect pour au moins 1 critère) ou en vert (correct pour tous les critères) la préparation réalisée. L’apprenant voit tout de suite si le forage est correct et peut immédiatement repérer le ou les critères défailants.

Nous avons souhaité également pouvoir paramétrer facilement les marges d’erreurs pour les différents critères afin d’augmenter la difficulté des exercices.

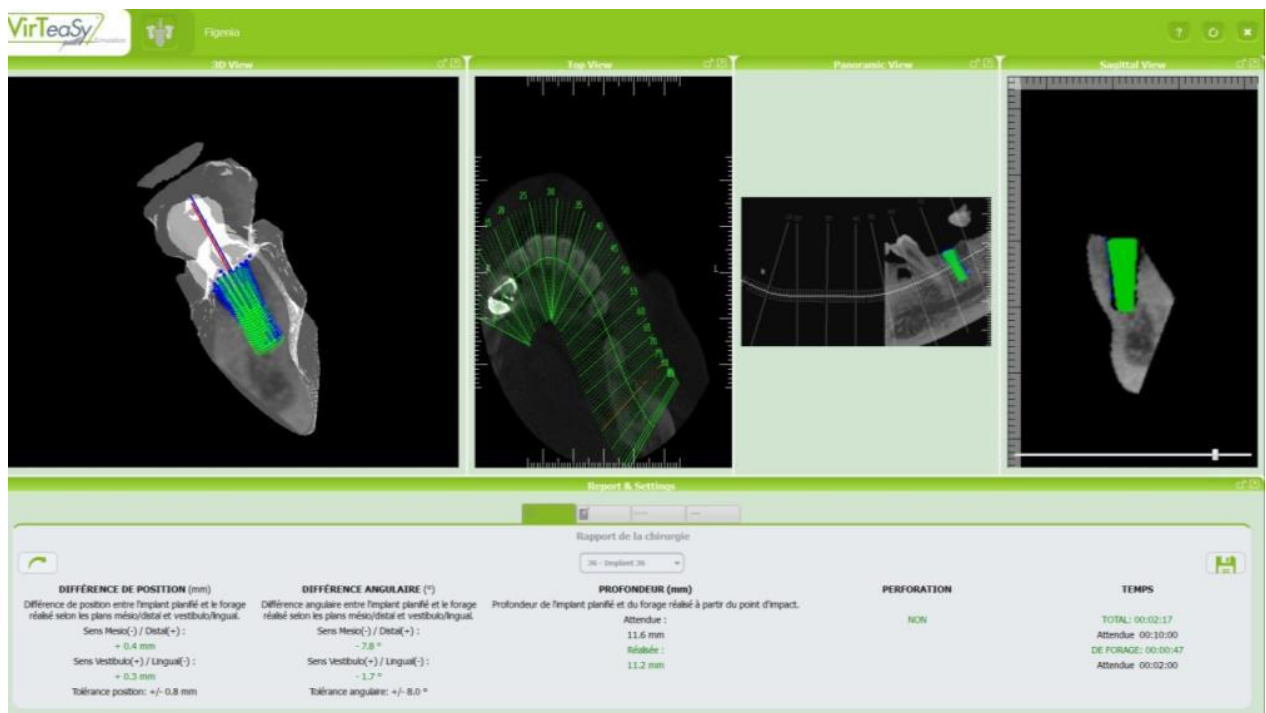


Figure 29: Module d'évaluation (les critères sont plus détaillés, les marges de tolérance sont désormais indiquées)

Nous avons également fait modifier la façon de positionner la scène et la possibilité de choisir les points d'appuis.

Nous avons également travaillé à la mise en place des scénarii qui sont décrits dans le simulateur ainsi que les protocoles qui permettent de réaliser les exercices.

Notre volonté dans ce travail est de permettre à l'apprenant d'être le plus autonome possible lors de l'utilisation du simulateur, de pouvoir s'auto évaluer et s'auto corriger.

D'autres améliorations peuvent être extraites de notre travail. L'évaluation de la différence d'angulation dans le simulateur qui est une valeur moyenne entre d'angulation vestibulo-linguale et mésio-distale ne rendait pas bien le profil évolutif des apprenants. Suite à cela, nous avons pu faire évoluer le module d'évaluation en permettant la distinction de ces 2 angulations de façons distinctes à l'instar de nos mesures sur le modèle en résine.

Les premiers résultats obtenus et l'amélioration du module d'évaluation qui en a découlé nous ont permis de poursuivre notre travail dans le but de valider l'intérêt de la vision 3D.

Les améliorations sont maintenant disponibles sur la nouvelle version et nous continuons à travailler avec les concepteurs sur le développement de nouveaux exercices fondés sur des cas cliniques réels.

III.1.2. En dentisterie restauratrice

Comme en implantologie dentaire, les simulateurs haptiques utilisés pour la formation en dentisterie restauratrice se révèlent être de véritables outils pédagogiques. Ils permettent une pratique des soins dans un environnement contrôlé, sûr, sans risque de morbidité et adapté en termes de contraintes d'enseignements⁸²⁻⁸⁴. De plus, les étudiants peuvent visualiser leur performance grâce à des évaluations et corrections et peuvent ainsi répéter et améliorer le geste demandé^{85,86}.

L'objectif de notre étude prospective était de déterminer la contribution des simulateurs haptiques à simuler une préparation cavitaire, en tant qu'outil d'enseignement pour la formation des étudiants de première année dentaire. Le but recherché est de fournir un environnement propice pour améliorer la formation préclinique des étudiants afin d'augmenter leur compétence et leur confiance avant leur premier acte clinique.

Ce travail a permis de confronter cette méthode d'apprentissage innovante avec la méthode classique de taille de cavité sur dents en ivoirine, les deux techniques permettant la réalisation du geste thérapeutique demandé. Le niveau des étudiants a été déterminé afin d'éviter le biais lié à une expérience déjà acquise. Ainsi, les étudiants de deuxième année d'Odontologie correspondaient bien à ces critères ; leur dextérité à réaliser des cavités étant très faible et de ce fait, leur évolution pouvait ainsi être mieux appréciée. Dans cette étude, une cavité de classe 2 de Black correspondait parfaitement à nos critères d'évaluation du fait qu'elle présente plusieurs niveaux et formes de taille.

Au sein d'un même groupe, nous avons pu observer une courbe d'apprentissage très marquée au cours de la phase d'entraînement^{74,87}. Nos résultats ont montré une forte évolution positive des critères objectifs. Effectivement, lors de son premier passage, un étudiant mettait en moyenne 216 sec pour réaliser l'acte demandé, pour seulement 149 sec lors de son troisième passage, soit une amélioration significative de l'ordre de 30% ($P < 0,001$). De plus, en un laps de temps diminué, son ratio « $100 - inside + outside$ » se voyait également significativement amélioré ($P < 0.05$). L'utilisation de ce ratio permettait de mieux appréhender l'évolution des étudiants par rapport aux seuls critères « *inside* » ou « *outside* » pris à part. Effectivement, un étudiant présentant un « *inside* » à 95% pouvait être considéré comme bon alors que son « *outside* » était à plus de 10% ; notre ratio permettait d'éliminer ce biais statistique en considérant l'ensemble de la performance de chaque étudiant. Concernant les critères subjectifs, la phase d'apprentissage sur simulateurs haptiques traduisait également une courbe d'apprentissage, essentiellement marquée pour les autres critères comme le « contour de forme de la cavité » et le « respect des profondeurs des cavités principale et secondaire » ($P < 0,05$ et $P < 0,01$, respectivement).

L'ensemble de la période d'apprentissage a été faite sans aide numérique pour éviter un biais avec le groupe travaillant sur dents en ivoirine, également sans aide. De même, l'examen final a été réalisé à l'aide d'un compagnonnage numérique afin que l'ensemble des étudiants aient à réaliser le même exercice dans des conditions d'évaluation similaires. Le groupe 1 a montré

un « % *inside* » et un ratio significativement amélioré ($P < 0.0001$ pour les deux) traduisant à nouveau une notion de courbe d'apprentissage sur simulateur. En revanche, les étudiants du groupe 1 ont été significativement plus lents lors de ce dernier exercice ($P < 0.01$). Ces résultats peuvent s'expliquer par une volonté des étudiants à vouloir enlever de façon minutieuse l'ensemble de la cible présente, entraînant ainsi un temps de travail plus long. Concernant les critères subjectifs, les étudiants ont amélioré significativement leurs résultats concernant les critères « contour de forme de la cavité » et « respect des profondeurs des cavités principale et secondaire » et nous noterons également une amélioration non significative du critère « atteinte iatrogène sur 46 ». Seul le critère « atteinte iatrogène 45 » était significativement moins bon que lors de la période d'apprentissage. Cependant, ce dernier critère est le seul à avoir été moins pertinent au cours du temps. Ce résultat peut s'expliquer par une volonté de vouloir toujours parfaire la préparation cavitaire au niveau de son ouverture mésiale, zone critique de la préparation pouvant résulter en une atteinte de la prémolaire adjacente.

Concernant l'examen final, seul les critères objectifs « % *outside* » et « temps de fraisage » présentaient une différence significative en faveur du groupe 1 ($P = 0,0045$ et $P < 0,0001$, respectivement). Il est cependant intéressant de souligner qu'aucune différence significative n'est relevée pour les critères « % *inside* » et « ratio ». Concernant les critères subjectifs, seul le critère « atteinte iatrogène sur 46 » présentait une différence significative en faveur du groupe 1. Ces résultats peuvent être expliqués par la plus forte expérience sur simulateur des étudiants du groupe 1 liée à leur période d'apprentissage. En outre, la faible différence entre le groupe 1 et le groupe 2 lors de cet examen final soulignait l'importante équivalence de ces approches pédagogiques.

Nos résultats sont en accord avec la littérature et démontrent que ces nouvelles technologies de formation en réalité virtuelle pourraient être utilisées dans le cadre de la formation préclinique des étudiants dentaires, permettant d'améliorer leur courbe d'apprentissage^{88-95, 96}. L'intérêt de ces approches est évident en termes de gain de temps, de formation individualisée et de moyens matériels et humains⁸²⁻⁸⁴. Grâce à ces outils et aux *feedback*, les courbes de progression se voient accélérées. De plus, des notions de libre-service permettraient aux étudiants de pouvoir se former en dehors de leurs heures précliniques, et ce sans la présence obligatoire d'enseignants.

L'objectif de la mise en place de cette nouvelle technologie serait donc de parfaire la formation des promotions dentaires précliniques⁶⁷. Effectivement, ces dernières sont de plus

en plus volumineuses et soulèvent un véritable problème d'encadrement en raison d'un ratio étudiants/enseignants de plus en plus faible ^{97,98}. Dans ce cadre, et pour l'ensemble des raisons énoncées au cours de cette étude, les méthodes d'apprentissage sur simulateurs haptiques sont des options pédagogiques de choix à considérer ⁹⁹.

La simulation haptique dans le domaine de l'odontologie, qu'il s'agisse de l'implantologie ou de la préparation cavitaire pourrait faire évoluer les paradigmes d'enseignement dans ces disciplines.

III.2. Nouveaux paramètres objectifs d'amélioration de la courbe d'apprentissage

III.2.1. La contribution du 3-D

Les simulateurs haptiques utilisés dans notre protocole expérimental font partie des simulateurs « haute-fidélité ». Ils proposent de fournir un environnement le plus réaliste possible à l'apprenant grâce à un dispositif haptique et à la visualisation d'une scène en 3 dimensions. Les différents éléments utilisés doivent permettre d'augmenter le degré de réalisme du simulateur (= fidélité). L'augmentation de la fidélité du simulateur comprend entre autres la fidélité graphique qui doit être investiguée ¹⁰⁰. Par le passé, l'utilisation de la vision 3D a montré son intérêt dans différents domaines comme en chirurgie neuroendoscopique ^{101,102} ou en chirurgie laparoscopique ¹⁰³⁻¹⁰⁶ et chirurgie robotique ¹⁰⁷. Ici nous avons souhaité observer l'intérêt de la vision 3D sur les compétences des apprenants mais également l'intérêt des aides numériques pour l'apprentissage de l'implantologie en simulation haptique.

La vision 3D en simulation est parfois à l'origine d'un inconfort visuel, de céphalées, de vertiges qui peuvent au final perturber l'apprenant, l'usage intensif d'un système de vision stéréoscopique aboutissant à une fatigue oculaire ^{108,109}. C'est pourquoi il est intéressant de savoir si l'utilisation de la vision 3D est indispensable dans une formation en implantologie sur simulateur.

En odontologie conservatrice il a été démontré que l'utilisation de la vision 3D dans des simulateurs haptiques permettait d'obtenir de meilleurs résultats ¹¹⁰.

Dans notre travail nous avons comparé les performances des deux groupes de même niveau bénéficiant ou non la vision 3D sur un exercice d'implantologie. L'ensemble des participants n'avait jamais réalisé de forage d'implantologie et avait reçu les mêmes consignes.

Nous avons pu noter qu'en présence d'aides virtuelles et de la vision 3D, les groupes présentaient des résultats similaires pour les différents paramètres, démontrant ainsi l'importance du compagnonnage numérique dans l'apprentissage de la gestuelle en chirurgie implantaire. Par ailleurs, comme nous l'avons montré dans une précédente étude ³⁶, une courbe de progression a pu être mise en évidence ; le groupe avec vision 3D présentait une amélioration constante des paramètres au cours du temps avec une réduction également de la variabilité et ce, même en l'absence de l'aide d'angulation .

En revanche, la suppression de l'aide virtuelle d'angulation ainsi que de la vision 3D entraînait une diminution marquée des performances du groupe sans vision 3D avec 14 perforations contre 6 dans le groupe 1.

Il est intéressant de noter que les 2 critères objectifs qui présentaient une différence significative entre les deux groupes étaient la différence de position vestibulo-linguale et le temps de forage. Concernant la différence de position, l'absence de vision 3D devait représenter un facteur déterminant car les deux groupes bénéficiaient toujours de l'aide de positionnement pour la réalisation de cet exercice et seule l'aide d'angulation était supprimée. Le deuxième paramètre qui présentait une différence significative entre les deux groupes était le temps de forage. Ceci pouvant être expliqué par le fait que le groupe avec vision 3D avait pu se familiariser avec le simulateur pendant deux séances de plus que le groupe sans vision 3D et ainsi être plus confiant et plus rapide avec l'utilisation de l'outil numérique mais également par la présence de la vision 3D comme le suggèrent Bhayani et col ¹⁰⁵ sur l'utilisation de la 3D en chirurgie laparoscopique.

La présence de la vision 3D et des aides numériques sont donc des éléments importants à prendre en compte pour développer ces nouveaux outils numériques d'apprentissage afin de renforcer leur efficacité pédagogique.

III.2.2. Les capteurs de mouvement

La maîtrise des gestes et la connaissance des procédures sont essentielles pour assurer une efficacité et une sécurité maximales pour le patient en chirurgie buccale comme dans d'autres disciplines chirurgicales ¹¹¹. Afin de renforcer l'évaluation objective des compétences la recherche et la validation de nouveaux critères pertinents paraissent capitale. Pour y parvenir, différents moyens peuvent être implémentés, comme les capteurs de mouvement. Dans la chirurgie laparoscopique, les capteurs ont été utilisés avec succès pour différencier plusieurs groupes de praticiens^{112,113}, et le développement de simulateurs avec technologie haptique nous permet également de considérer une évaluation objective des futurs chirurgiens ¹¹⁴⁻¹¹⁷. D'autres méthodes, comme le suivi des yeux, ont également permis de différencier les praticiens de différents niveaux ¹¹⁸. Enfin, l'utilisation de grilles de corrections telles que celles utilisées lors d'ECOS (Evaluation Clinique Objective Structurée) réduit la subjectivité sans la supprimer complètement ¹¹⁹⁻¹²¹.

Comme pour la chirurgie laparoscopique et la chirurgie robotique, les compétences en chirurgie buccale doivent être considérées sous l'angle de l'économie du mouvement, ce qui reflète une certaine compétence de l'opérateur. Lors de nos expériences, nous avons pu différencier les experts et les novices par l'évaluation subjective des vidéos de la procédure.

Les différents critères utilisés nous ont permis de classer les novices et les praticiens expérimentés. Conformément à ce qui a été montré dans la chirurgie robotique ¹⁰⁷, le groupe de praticiens expérimentés a montré une économie de mouvement significativement plus grande que le groupe novice. Il semble donc intéressant de trouver un moyen de mesurer objectivement ce paramètre. C'est ce qui a été fait dans cette étude avec l'utilisation de capteurs de mouvement. Les résultats obtenus nous ont permis de voir une nette amélioration dans le groupe expérimenté par rapport à d'autres groupes.

Nous voulions également définir objectivement la fluidité de l'opération qui caractérise la compétence du praticien. Pour ce faire, nous avons calculé l'accélération totale résultante pendant la procédure mesurée par les capteurs. Il a été démontré que les notes obtenues grâce aux capteurs sont comparables à celles fournies par l'évaluateur.

Par ailleurs, lors de nos travaux, nous avons utilisé des capteurs fixés aux poignets des participants pour éviter d'entraver leur performance pendant le test. Les participants n'ont signalé aucune difficulté avec le placement et l'utilisation de ces capteurs.

Cependant, nous pouvons trouver certaines limites à l'étude menée sur ces capteurs. En effet, la taille de l'échantillon est limitée. Les paramètres du modèle (pièce anatomique) doivent être modifiés et adaptés si la procédure change. La traduction des données des capteurs en niveau (discrets) d'évaluation dépend de la taille et de la performance des groupes.

Tout au long de nos expériences nous avons essayé de maintenir des conditions de test aussi standard que possible afin de limiter tous les biais, cependant l'utilisation de modèles humides implique une détérioration du modèle avec chaque procédure effectuée. L'utilisation d'un modèle standard (modèle synthétique par exemple) validé pour chaque participant pourrait aider à réduire la variance qui pourrait être introduite par l'utilisation du modèle animal.

Les résultats issus de ces travaux laissent entrevoir la possibilité d'enrichir l'auto-évaluation en simulation par la mesure de l'économie de mouvement et de la fluidité. En effet, le couplage de ces capteurs au simulateur pour fournir d'autres informations à l'apprenant mais également à l'enseignant afin de mieux rendre compte des compétences de l'opérateur serait une piste d'évolution intéressante pour les simulateurs.

En dentisterie, comme dans d'autres domaines médicaux, il est nécessaire d'identifier les critères pertinents et de trouver un moyen simple de mesurer ces critères. Ici, nous avons étudié la valeur et la convivialité d'un système de capteurs de mouvement, qui nous a permis d'évaluer l'économie des mouvements et la fluidité des opérateurs qui apparaissent pertinents mais pas suffisant pour certifier le geste thérapeutique. Concernant les procédures de sutures, d'autres critères et capteurs devraient être pris en compte afin d'obtenir une évaluation complètement objective. La mise en place d'un tel système pourrait permettre une auto-évaluation qui serait pertinente pour les étudiants.

IV. Conclusion

En odontologie, comme dans d'autres domaines de formation en santé, de nouvelles approches pédagogiques se mettent en place pour essayer d'apporter une réponse efficace à la difficile équation entre un faible nombre d'encadrants et une augmentation constante d'apprenants. Par ailleurs, l'émergence de la disponibilité numérique favorise l'apparition de nouveaux paradigmes pédagogiques en complément des méthodologies d'enseignement traditionnel.

On observe ainsi une évolution de l'apprentissage conventionnel en présentiel synchrone (cours magistraux) vers des formations à distance synchrones ou asynchrones. Cela a permis une augmentation de la capacité de diffusion de l'information au plus grand nombre. Cependant, la question de la formation pratique reste en suspens. C'est le cas de la validation des compétences en chirurgie dentaire qui souligne la maîtrise de la pratique. L'écueil contemporain à ce besoin est la nécessité de ressources importantes (matériels coûteux, mobilisation accrue de l'équipe pédagogique), qui limite ainsi la pratique en présentiel synchrone (multiplication des séances asynchrones pour satisfaire l'exigence pédagogique).

Pour qu'une nouvelle méthode d'enseignement soit intéressante, il faut à l'instar de la recherche sur les médicaments, démontrer que la nouvelle stratégie d'enseignement est au moins équivalente aux modalités d'enseignements déjà reconnues comme efficace. Or à la différence des médicaments où l'efficacité peut être évaluée de façon objective et quantifiable, l'évaluation des compétences en implantologie et en odontologie conservatrice, fait la plupart du temps appel à une évaluation subjective de la part des enseignants. C'est pourquoi, nous avons dû repenser les critères de jugement (en implantologie, dentisterie restauratrice et même chirurgie buccale) de manière à ce qu'ils puissent être évalués objectivement par les simulateurs ou d'autres outils électroniques.

Au cours des dernières années, la simulation de haute-fidélité est devenue un outil de plus en plus populaire pour la formation des compétences en équipe dans les domaines à risque.

Comme tout autre outil, l'efficacité de la technologie de simulation dépend de la façon dont elle est utilisée et le degré de fidélité ne fait pas tout. La conception du programme d'apprentissage reste le point majeur sur lequel les formateurs doivent travailler. Nous devons garder à l'esprit que la simulation n'est qu'un outil parmi d'autres.

Pour proposer des formations de qualité il faut que les formateurs maximisent leurs ressources de formation en tirant parti de tous les types de simulations disponibles.

La réalité virtuelle haptique est une méthode pédagogique en pleine démocratisation de par ses nombreux avantages de coût, de sécurité ou encore de ressources humaines ¹²². De plus, cette technique numérique permet de répéter l'acte autant de fois que nécessaire sans aucune limite de temps ¹²³. Les étudiants peuvent suivre leur évolution de façon objective grâce aux *feedback* automatiques ^{85,86}. Les notions de briefing-débriefing / *feedback* jouent un rôle très important dans le cycle d'apprentissage ¹²⁴. Nos résultats confirment ces conclusions et

montrent clairement et de façon significative de rapides améliorations. Les simulateurs en réalité virtuelle haptique apportent donc une réelle interactivité permettant d'acquérir plus rapidement les objectifs des exercices demandés^{74,87}.

Lors de nos travaux nous avons pu mettre en avant l'intérêt de la simulation dans l'enseignement de l'implantologie mais également de l'odontologie conservatrice. Nous avons souligné l'intérêt de la vision 3D dans la conception de ces nouveaux outils pédagogiques et cherché à définir et mesurer des critères de performances objectifs. Cependant, toute cette technologie ne constitue qu'un outil parmi d'autres pour aider les enseignants dans leurs tâches.

Le choix de la simulation dépend d'un nombre de facteurs, tels que les besoins de formation, les ressources et le nombre de personnes à former.

Les recommandations actuelles sont d'utiliser les simulateurs de basse fidélité pour les novices et les simulateurs haute-fidélité pour les experts.

En effet l'objectif principal pour les novices est de développer des compétences pratiques pour atteindre l'automatisme à l'image de ce que nous avons pu mettre en évidence dans nos expérimentations.

La simulation utilisée dans un cadre d'un mélange subtil entre le Behaviourisme et/ou le socio constructivisme peut contribuer à enrichir le parcours pédagogique pour répondre aux attentes des nouvelles générations dont les maîtres mots sont « communiquer, collaborer et créer ». Elle permet la répétition d'un acte technique sans augmentation du coût de formation et peut fournir une évaluation objective et quantifiable de certains paramètres. Le « compagnonnage numérique » permet dans certaines situations de libérer du temps pour l'enseignant mais n'est pas adapté à tous les stades d'apprentissage. Dans une société où le rapport au temps est raccourci et est marqué par le court terme avec pour axiome de base « ici et maintenant », l'utilisation de la simulation comme outil pédagogique devient de plus en plus central sans toutefois représenter la panacée universelle. Comme le souligne l'OCDE¹²⁵ dans son rapport « l'utilisation d'outils numériques par les élèves n'aide pas à l'apprentissage s'il n'est pas accompagné d'une pédagogie adaptée ».

V. Bibliographie

1. Chauvigné C, Coulet J-C. L'approche par compétences : un nouveau paradigme pour la pédagogie universitaire ? Revue française de pédagogie Recherches en éducation. 15 juill 2010;(172):15-28.
2. THEORIES DE L'APPRENTISSAGE - Theories_apprentissage.pdf [Internet]. [cité 3 juin 2017]. Disponible sur: http://www.ac-nice.fr/iencagnes/file/peda/general/Theories_apprentissage.pdf
3. Vygotsky LS. Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Harvard University Press; 1980. 175 p.
4. Joëlle P-C. Bruner (Jérôme S.). — Le Développement de l'enfant : savoir faire, savoir dire. Revue française de pédagogie. 1985;73(1):79-80.
5. Bilotta FF, Werner SM, Bergese SD, Rosa G. Impact and Implementation of Simulation-Based Training for Safety. ScientificWorldJournal. 2013;2013:652956.
6. Boet S, Granry J-C, Savoldelli G. La simulation en santé: De la théorie à la pratique. Springer Science & Business Media; 2013. 439 p.
7. From Visual Simulation to Virtual Reality to Games [Internet]. [cité 12 juin 2017]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/2956388_From_Visual_Simulation_to_Virtual_Reality_to_Games
8. Abt CC. Serious Games. University Press of America; 1987. 200 p.
9. Lelardeux C. Serious Game, Simulateur, Serious play : état de l'art pour la formation en santé (PDF Download Available) [Internet]. [cité 12 juin 2017]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/285853894_Serious_Game_Simulateur_Serious_play_etat_de_l%27art_pour_la_formation_en_sante
10. Les jeux et les hommes - Folio essais - Folio - GALLIMARD - Site Gallimard [Internet]. [cité 12 juin 2017]. Disponible sur: <http://www.gallimard.fr/Catalogue/GALLIMARD/Folio/Folio-essais/Les-jeux-et-les-hommes>
11. Simulation Versus Narrative: Introduction to Ludology [Internet]. ResearchGate. [cité 12 juin 2017]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/263565704_Simulation_Versus_Narrative_Introduction_to_Ludology
12. Une taxinomie des Serious Games dédiés au secteur de la santé (PDF Download Available) [Internet]. [cité 12 juin 2017]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/283846840_Une_taxinomie_des_Serious_Games_dedies_au_secteur_de_la_sante?enrichId=rgreq-d410964f9a90f0e8bd4dbc1ef9a225a9-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4Mzg0Njg0MDtBUzoyOTU5ODExNzUzMjg3NzVAMTQ0NzU3ODgxOTkxMA%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf

13. La simulation en ergonomie. Connaître, agir et interagir - Pascal Béguin, Annie Weill-Fassina, Collectif [Internet]. [cité 23 févr 2015]. Disponible sur: <http://www.decitre.fr/livres/la-simulation-en-ergonomie-9782906769410.html>
14. Gaba DM, Howard SK, Fish KJ, Smith BE, Sowb YA. Simulation-Based Training in Anesthesia Crisis Resource Management (ACRM): A Decade of Experience. *Simulation & Gaming*. 1 juin 2001;32(2):175-93.
15. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Acad Med*. août 2003;78(8):783-8.
16. Rapport - simulation_en_sante_-_rapport.pdf [Internet]. [cité 3 nov 2013]. Disponible sur: http://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2012-01/simulation_en_sante_-_rapport.pdf
17. Bordier R, Guérin L, Nussbaumer J. Compte rendu du colloque sur l'ingénierie numérique organisé, le 25 novembre 2011, par l'Académie des Technologies, le Conseil Économique, Social et Environnemental et le Conseil général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies, A synopsis of the symposium on digital engineering, organized on 25 November 2011 by the Académie des Technologies, the Conseil Général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies and the Conseil Économique, Social et Environnemental. *Annales des Mines - Réalités industrielles*. Février 2012(1):117-25.
18. Clostermann J-P. La Conduite du navire marchand: Facteurs humains dans une activité à risques. Infomer; 2014. 252 p.
19. Dunkin B, Adrales GL, Apeltgren K, Mellinger JD. Surgical simulation: a current review. *Surg Endosc*. mars 2007;21(3):357-66.
20. Kapoor S, Arora P, Kapoor V, Jayachandran M, Tiwari M. Haptics – Touchfeedback Technology Widening the Horizon of Medicine. *J Clin Diagn Res*. mars 2014;8(3):294-9.
21. Buck GH. Development of simulators in medical education. *Gesnerus*. 1991;48 Pt 1:7-28.
22. Escobar-Castillejos D, Noguez J, Neri L, Magana A, Benes B. A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training. *J Med Syst*. avr 2016;40(4):104.
23. Le traité de la réalité virtuelle. Volume 1, L'homme et l'environnement virtuel - Alain Berthoz, Jean-Louis Vercher [Internet]. [cité 22 févr 2015]. Disponible sur: <http://www.decitre.fr/livres/le-traite-de-la-realite-virtuelle-9782911762628.html>
24. Beaubien J, Baker D. The use of simulation for training teamwork skills in health care: how low can you go? *Qual Saf Health Care*. oct 2004;13(Suppl 1):i51-6.
25. A Handbook of Flight Simulation Fidelity Requirements for Human Factors Research [Internet]. [cité 16 juin 2017]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/235206764_A_Handbook_of_Flight_Simulation_Fidelity_Requirements_for_Human_Factors_Research

26. Simulation et jeu de simulation : outils éducatifs appliqués à la santé. | Base documentaire | BDSP [Internet]. [cité 26 juin 2017]. Disponible sur: <http://www.bdsp.ehesp.fr/Base/34649/>
27. Scalese RJ, Obeso VT, Issenberg SB. Simulation Technology for Skills Training and Competency Assessment in Medical Education. *J GEN INTERN MED*. 1 janv 2008;23(1):46-9.
28. Cohen ER, Feinglass J, Barsuk JH, Barnard C, O'Donnell A, McGaghie WC, et al. Cost savings from reduced catheter-related bloodstream infection after simulation-based education for residents in a medical intensive care unit. *Simul Healthc*. avr 2010;5(2):98-102.
29. Sutherland LM, Middleton PF, Anthony A, Hamdorf J, Cregan P, Scott D, et al. Surgical Simulation. *Ann Surg*. mars 2006;243(3):291-300.
30. Perry S, Bridges SM, Burrow MF. A review of the use of simulation in dental education. *Simul Healthc*. févr 2015;10(1):31-7.
31. La sinistralité en implantologie repart fortement à la hausse [Internet]. [cité 5 juin 2017]. Disponible sur: <http://www.information-dentaire.fr/articles/2442/La-sinistralite-en-implantologie-repart-fortement-a-la-hausse>
32. Salas E, Cannon-Bowers JA, Blickensderfer EL. Team Performance and Training Research: Emerging Principles. *Journal of the Washington Academy of Sciences*. 1993;83(2):81-106.
33. Rhienmora P, Haddawy P, Khanal P, Suebnukarn S, Dailey MN. A virtual reality simulator for teaching and evaluating dental procedures. *Methods Inf Med*. 2010;49(4):396-405.
34. Gal GB, Weiss EI, Gafni N, Ziv A. Preliminary assessment of faculty and student perception of a haptic virtual reality simulator for training dental manual dexterity. *J Dent Educ*. avr 2011;75(4):496-504.
35. Diego JS. The feasibility of capturing learner interactions based on logs informed by eye-tracking and remote observation studies. *Journal of Interactive Media in Education* [Internet]. 2009 [cité 25 févr 2015]; Disponible sur: [https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/publications/the-feasibility-of-capturing-learner-interactions-based-on-logs-informed-by-eyetracking-and-remote-observation-studies\(0ef33035-5062-475b-ab3f-033b15ed2743\)/export.html](https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/publications/the-feasibility-of-capturing-learner-interactions-based-on-logs-informed-by-eyetracking-and-remote-observation-studies(0ef33035-5062-475b-ab3f-033b15ed2743)/export.html)
36. Joseph D, Jehl J-P, Maureira P, Perrenot C, Miller N, Bravetti P, et al. Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology. *BioMed Research International*. 20 févr 2014;2014:e413951.
37. Pohlenz P, Gröbe A, Petersik A, von Sternberg N, Pflesser B, Pommert A, et al. Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *J Craniomaxillofac Surg*. déc 2010;38(8):560-4.

38. Luciano C, Banerjee P, DeFanti T. Haptics-based virtual reality periodontal training simulator. *Virtual Real.* juin 2009;13(2):69–85.
39. Rees JS, Jenkins SM, James T, Dummer PMH, Bryant S, Hayes SJ, et al. An initial evaluation of virtual reality simulation in teaching pre-clinical operative dentistry in a UK setting. *Eur J Prosthodont Restor Dent.* juin 2007;15(2):89–92.
40. Zheng J-W, Cao X, Lin Y-H, Zhang J-Z, Feng X-P. [An introduction of DentSim in pre-clinical dental training and practice]. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue.* déc 2014;23(6):749–54.
41. Welk A, Maggio MP, Simon JF, Scarbecz M, Harrison JA, Wicks RA, et al. Computer-assisted learning and simulation lab with 40 DentSim units. *Int J Comput Dent.* 2008;11(1):17–40.
42. Hollis W, Darnell LA, Hottel TL. Computer assisted learning: a new paradigm in dental education. *J Tenn Dent Assoc.* 2011;91(4):14–18; quiz 18–19.
43. Welk A, Splieth C, Rosin M, Kordass B, Meyer G. DentSim - a future teaching option for dentists. *Int J Comput Dent.* avr 2004;7(2):123–30.
44. Wierinck E, Puttemans V, Swinnen S, van Steenberghe D. Effect of augmented visual feedback from a virtual reality simulation system on manual dexterity training. *Eur J Dent Educ.* févr 2005;9(1):10–6.
45. Wierinck E, Puttemans V, van Steenberghe D. Effect of reducing frequency of augmented feedback on manual dexterity training and its retention. *J Dent.* oct 2006;34(9):641–7.
46. Wierinck E, Puttemans V, van Steenberghe D. Effect of tutorial input in addition to augmented feedback on manual dexterity training and its retention. *Eur J Dent Educ.* févr 2006;10(1):24–31.
47. Kikuchi H, Ikeda M, Araki K. Evaluation of a virtual reality simulation system for porcelain fused to metal crown preparation at Tokyo Medical and Dental University. *J Dent Educ.* juin 2013;77(6):782–92.
48. Buchanan JA. Experience with virtual reality-based technology in teaching restorative dental procedures. *J Dent Educ.* déc 2004;68(12):1258–65.
49. Welk A, Splieth C, Seyer D, Rosin M, Siemer M, Meyer G. German dental faculty attitudes towards computer-assisted simulation systems correlated with personal and professional profiles. *Eur J Dent Educ.* mai 2006;10(2):87–95.
50. Chen M-L, Su Z-Y, Wu T-Y, Shieh T-Y, Chiang C-H. Influence of dentistry students' e-Learning satisfaction: a questionnaire survey. *J Med Syst.* déc 2011;35(6):1595–603.
51. Lackey MA. One year's experience with virtual reality preclinical laboratory simulation at the University of Tennessee. *Int J Comput Dent.* avr 2004;7(2):131–41.

52. Yasukawa Y. [The effectiveness of cavity preparation training using a virtual reality simulation system with or without feedback]. *Kokubyo Gakkai Zasshi*. juin 2009;76(2):73-80.
53. R. Linke, A. Leichtle, F. Sheikh, C. Schmidt, H. Frenzel, H. Graefe, et al. Assessment of skills using a virtual reality temporal bone surgery simulator. *Acta Otorhinolaryngologica Italica*. août 2013;33:273-81.
54. Reddy-Kolanu G, Alderson D. Evaluating the effectiveness of the Voxel-Man TempoSurg virtual reality simulator in facilitating learning mastoid surgery. *Annals of The Royal College of Surgeons of England*. 1 avr 2011;93(3):205-8.
55. 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*. mars 2012;146(3):497-503.
56. Tolsdorff B, Petersik A, Pflesser B, Pommert A, Tiede U, Leuwer R, et al. Individual models for virtual bone drilling in mastoid surgery. *Computer Aided Surgery*. 1 janv 2009;14(1-3):21-7.
57. Arndt S, Beck R, Schild C, Grauvogel T d., Laszig R, Aschendorff A. Management of cochlear implantation in patients with malformations. *Clinical Otolaryngology*. 1 juin 2010;35(3):220-7.
58. 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*. sept 2012;33(7):1225-31.
59. Abou-Elhamd K-EA, Al-Sultan AI, Rashad UM. Simulation in ENT medical education. *The Journal of Laryngology & Otology*. mars 2010;124(03):237-241.
60. 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*. 1 juin 2012;122(6):1385-91.
61. Zirkle M, Roberson DW, Leuwer R, Dubrowski A. Using a Virtual Reality Temporal Bone Simulator to Assess Otolaryngology Trainees. *The Laryngoscope*. 1 févr 2007;117(2):258-63.
62. 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*. 2014;12(2):141-5.
63. von Sternberg N, Bartsch MS, Petersik A, Wiltfang J, Sibbersen W, Grindel T, et al. Learning by doing virtually. *Int J Oral Maxillofac Surg*. mai 2007;36(5):386-90.
64. San Diego JP, Newton T, Quinn BFA, Cox MJ, Woolford MJ. Levels of agreement between student and staff assessments of clinical skills in performing cavity preparation in artificial teeth. *Eur J Dent Educ*. févr 2014;18(1):58-64.

65. Steinberg AD, Bashook PG, Drummond J, Ashrafi S, Zefran M. Assessment of faculty perception of content validity of PerioSim, a haptic-3D virtual reality dental training simulator. *J Dent Educ.* déc 2007;71(12):1574-82.
66. Tanzawa T, Futaki K, Tani C, Hasegawa T, Yamamoto M, Miyazaki T, et al. Introduction of a robot patient into dental education. *Eur J Dent Educ.* févr 2012;16(1):e195-199.
67. LeBlanc VR, Urbankova A, Hadavi F, Lichtenthal RM. A preliminary study in using virtual reality to train dental students. *J Dent Educ.* mars 2004;68(3):378-83.
68. Koole S, Vandeweghe S, Mattheos N, De Bruyn H. Implant dentistry education in Europe: 5 years after the Association for Dental Education in Europe consensus report. *Eur J Dent Educ.* 1 mars 2014;18:43-51.
69. Plasschaert AJM, Manogue M, Lindh C, McLoughlin J, Murtomaa H, Nattestad A, et al. Curriculum content, structure and ECTS for European dental schools. Part II: methods of learning and teaching, assessment procedures and performance criteria. *Eur J Dent Educ.* août 2007;11(3):125-36.
70. Okuda Y, Bryson EO, DeMaria S Jr, Jacobson L, Quinones J, Shen B, et al. The utility of simulation in medical education: what is the evidence? *Mt Sinai J Med.* août 2009;76(4):330-43.
71. Eve EJ, Koo S, Alshihri AA, Cormier J, Kozhenikov M, Donoff RB, et al. Performance of Dental Students Versus Prosthodontics Residents on a 3D Immersive Haptic Simulator. *J Dent Educ.* 4 janv 2014;78(4):630-7.
72. Ben-Gal G, Weiss EI, Gafni N, Ziv A. Testing manual dexterity using a virtual reality simulator: reliability and validity. *European Journal of Dental Education.* 2013;17(3):138-142.
73. Marras I, Nikolaidis N, Mikrogeorgis G, Lyroudia K, Pitas I. A virtual system for cavity preparation in endodontics. *J Dent Educ.* avr 2008;72(4):494-502.
74. Suebnukarn S, Haddawy P, Rhienmora P, Jittimanee P, Viratket P. Augmented kinematic feedback from haptic virtual reality for dental skill acquisition. *J Dent Educ.* déc 2010;74(12):1357-66.
75. Pohlenz P, Gröbe A, Petersik A, von Sternberg N, Pflesser B, Pommert A, et al. Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *J Craniomaxillofac Surg.* déc 2010;38(8):560-4.
76. Leong DJ-M, Chan H-L, Yeh C-Y, Takarakis N, Fu J-H, Wang H-L. Risk of lingual plate perforation during implant placement in the posterior mandible: a human cadaver study. *Implant Dent.* oct 2011;20(5):360-3.
77. Ioannou I, Kazmierczak E, Stern L, Smith AC, Wise LZ, Field B. Towards defining dental drilling competence, part 1: a study of bone drilling technique. *J Dent Educ.* sept 2010;74(9):931-40.

78. Ioannou I, Stern L, Kazmierczak E, Smith AC, Wise LZ. Towards defining dental drilling competence, part 2: a study of cues and factors in bone drilling. *J Dent Educ.* sept 2010;74(9):941-50.
79. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl J-P, Felblinger J, Bresler L, et al. The virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc.* sept 2012;26(9):2587-93.
80. Perez M, Perrenot C, Tran N, Hossu G, Felblinger J, Hubert J. Prior experience in micro-surgery may improve the surgeon's performance in robotic surgical training. *Int J Med Robot.* sept 2013;9(3):351-8.
81. Fanning RM, Gaba DM. The role of debriefing in simulation-based learning. *Simul Healthc.* 2007;2(2):115-25.
82. Miller MD. Office procedures. Education, training, and proficiency of procedural skills. *Prim Care.* juin 1997;24(2):231-40.
83. Derossis AM, Fried GM, Abrahamowicz M, Sigman HH, Barkun JS, Meakins JL. Development of a model for training and evaluation of laparoscopic skills. *Am J Surg.* juin 1998;175(6):482-7.
84. Kalsi AS, Higham H, McKnight M, Dhariwal DK. Simulation training for dental foundation in oral and maxillofacial surgery - a new benchmark. *Br Dent J.* déc 2013;215(11):571-6.
85. Carr MM, Reznick RK, Brown DH. Comparison of computer-assisted instruction and seminar instruction to acquire psychomotor and cognitive knowledge of epistaxis management. *Otolaryngol Head Neck Surg.* oct 1999;121(4):430-4.
86. Kokoska MS, Citardi MJ. Computer-aided surgical reduction of facial fractures. *Facial Plast Surg.* 2000;16(2):169-79.
87. Buchanan JA. Experience with virtual reality-based technology in teaching restorative dental procedures. *J Dent Educ.* déc 2004;68(12):1258-65.
88. Gallagher AG, Richie K, McClure N, McGuigan J. Objective psychomotor skills assessment of experienced, junior, and novice laparoscopists with virtual reality. *World J Surg.* nov 2001;25(11):1478-83.
89. Gallagher AG, Lederman AB, McGlade K, Satava RM, Smith CD. Discriminative validity of the Minimally Invasive Surgical Trainer in Virtual Reality (MIST-VR) using criteria levels based on expert performance. *Surg Endosc.* avr 2004;18(4):660-5.
90. Gallagher K, Stephenson J, Brown R, Holmes C, Ballester P. Exploiting 3D Spatial Sampling in Inverse Modeling of Thermochronological Data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry.* 1 janv 2005;58(1):375-87.
91. Moorthy K, Munz Y, Sarker SK, Darzi A. Objective assessment of technical skills in surgery. *BMJ.* 1 nov 2003;327(7422):1032-7.

92. Quinn F, Keogh P, McDonald A, Hussey D. A study comparing the effectiveness of conventional training and virtual reality simulation in the skills acquisition of junior dental students. *Eur J Dent Educ.* nov 2003;7(4):164-9.
93. Wierinck E, Puttemans V, Swinnen S, van Steenberghe D. Effect of augmented visual feedback from a virtual reality simulation system on manual dexterity training. *Eur J Dent Educ.* févr 2005;9(1):10-6.
94. Wierinck ER, Puttemans V, Swinnen SP, van Steenberghe D. Expert performance on a virtual reality simulation system. *J Dent Educ.* juin 2007;71(6):759-66.
95. van der Meijden O a. J, Schijven MP. The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review. *Surg Endosc.* juin 2009;23(6):1180-90.
96. Buchanan JA. Use of simulation technology in dental education. *J Dent Educ.* nov 2001;65(11):1225-31.
97. Morton J, Cumming A, Cameron H. Performance-based assessment in undergraduate medical education. *The Clinical Teacher.* 1 mars 2007;4(1):36-41.
98. Cederberg RA, Bentley DA, Halpin R, Valenza JA. Use of virtual patients in dental education: a survey of U.S. and Canadian dental schools. *J Dent Educ.* oct 2012;76(10):1358-64.
99. McGaghie WC, Issenberg SB, Petrusa ER, Scalese RJ. A critical review of simulation-based medical education research: 2003-2009. *Med Educ.* janv 2010;44(1):50-63.
100. Wang D, Li T, Zhang Y, Hou J. Survey on multisensory feedback virtual reality dental training systems. *Eur J Dent Educ.* 1 nov 2015;n/a-n/a.
101. Marcus HJ, Hughes-Hallett A, Cundy TP, Di Marco A, Pratt P, Nandi D, et al. Comparative Effectiveness of 3-Dimensional vs 2-Dimensional and High-Definition vs Standard-Definition Neuroendoscopy: A Preclinical Randomized Crossover Study. *Neurosurgery.* avr 2014;74(4):375-81.
102. Fraser JF, Allen B, Anand VK, Schwartz TH. Three-dimensional neurostereoendoscopy: subjective and objective comparison to 2D. *Minim Invasive Neurosurg.* févr 2009;52(1):25-31.
103. Lusch A, Bucur PL, Menhadji AD, Okhunov Z, Liss MA, Perez-Lanzac A, et al. Evaluation of the impact of three-dimensional vision on laparoscopic performance. *J Endourol.* févr 2014;28(2):261-6.
104. Votanopoulos K, Brunicardi FC, Thornby J, Bellows CF. Impact of three-dimensional vision in laparoscopic training. *World J Surg.* janv 2008;32(1):110-8.
105. Bhayani SB, Andriole GL. Three-Dimensional (3D) Vision: Does It Improve Laparoscopic Skills? An Assessment of a 3D Head-Mounted Visualization System. *Rev Urol.* 2005;7(4):211-4.

106. Tanagho YS, Andriole GL, Paradis AG, Madison KM, Sandhu GS, Varela JE, et al. 2D versus 3D visualization: impact on laparoscopic proficiency using the fundamentals of laparoscopic surgery skill set. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*. nov 2012;22(9):865-70.
107. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl J-P, Felblinger J, Bresler L, et al. The virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc*. sept 2012;26(9):2587-93.
108. Lambooij M, Fortuin M, Heynderickx I, IJsselsteijn W. Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *Journal of Imaging Science and Technology*. 1 mai 2009;53(3):30201-1-30201-14.
109. Shibata T, Kim J, Hoffman DM, Banks MS. The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision*. 5 juill 2011;11(8):11-11.
110. de Boer IR, Wesselink PR, Vervoorn JM. Student performance and appreciation using 3D vs. 2D vision in a virtual learning environment. *Eur J Dent Educ*. 1 août 2016;20(3):142-7.
111. Grigoresco B, Mignon A, Tesniere A. La simulation en santé, de la théorie à la pratique. *La revue de l'infirmiere*. 2014;63(204):17-9.
112. Salamo O, Ismayel AS, Rodríguez O, Sánchez R, Pena R, Báez V& M. Evaluation of surgical skills for laparoscopic surgery: study of movement patterns by means of accelerometers. *VITAE Academia Biomédica Digital*. 0(58):4945.
113. Sánchez A, Rodríguez O, Sánchez R, Benítez G, Pena R, Salamo O, et al. Laparoscopic Surgery Skills Evaluation: Analysis Based on Accelerometers. *JSLs [Internet]*. 2014 [cité 21 déc 2015];18(4). Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4254482/>
114. Botden SMBI, Torab F, Buzink SN, Jakimowicz JJ. The importance of haptic feedback in laparoscopic suturing training and the additive value of virtual reality simulation. *Surg Endosc*. mai 2008;22(5):1214-22.
115. Dehabadi M, Fernando B, Berlingieri P. The use of simulation in the acquisition of laparoscopic suturing skills. *Int J Surg*. 2014;12(4):258-68.
116. Joseph D, Jehl J-P, Maureira P, Perrenot C, Miller N, Bravetti P, et al. Relative contribution of haptic technology to assessment and training in implantology. *Biomed Res Int*. 2014;2014:413951.
117. Uemura M, Yamashita M, Tomikawa M, Obata S, Souzaki R, Ieiri S, et al. Objective assessment of the suture ligation method for the laparoscopic intestinal anastomosis model using a new computerized system. *Surgical Endoscopy [Internet]*. 9 juill 2014 [cité 15 oct 2014]; Disponible sur: <http://link.live.springer.com.bases-doc.univ-lorraine.fr/article/10.1007/s00464-014-3681-9/fulltext.html>
118. Richstone L, Schwartz MJ, Seideman C, Cadeddu J, Marshall S, Kavoussi LR. Eye metrics as an objective assessment of surgical skill. *Ann Surg*. juill 2010;252(1):177-82.

119. Hanson C, Mossey P, Macluskey M. The assessment of suturing skills of dental undergraduates. *Eur J Dent Educ.* mai 2010;14(2):113-7.
120. Niitsu H, Hirabayashi N, Yoshimitsu M, Mimura T, Taomoto J, Sugiyama Y, et al. Using the Objective Structured Assessment of Technical Skills (OSATS) global rating scale to evaluate the skills of surgical trainees in the operating room. *Surg Today.* mars 2013;43(3):271-5.
121. Scott BJ, Evans DJ, Drummond JR, Mossey PA, Stirrups DR. An investigation into the use of a structured clinical operative test for the assessment of a clinical skill. *Eur J Dent Educ.* févr 2001;5(1):31-7.
122. Haque S, Srinivasan S. A meta-analysis of the training effectiveness of virtual reality surgical simulators. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* janv 2006;10(1):51-8.
123. Abraham J, Wade DM, O'Connell KA, Desharnais S, Jacoby R. The use of simulation training in teaching health care quality and safety: an annotated bibliography. *Am J Med Qual.* juin 2011;26(3):229-38.
124. Fanning RM, Gaba DM. The role of debriefing in simulation-based learning. *Simul Healthc.* 2007;2(2):115-25.
125. Connectes-pour-apprendre-les-eleves-et-les-nouvelles-technologies-principaux-resultats.pdf [Internet]. [cité 24 août 2017]. Disponible sur: <http://www.oecd.org/fr/edu/scolaire/Connectes-pour-apprendre-les-eleves-et-les-nouvelles-technologies-principaux-resultats.pdf>

« Impact de la simulation haptique dans l'enseignement en odontologie »

Résumé :

Le développement rapide des nouvelles technologies numériques est en passe de révolutionner l'enseignement classique de l'odontologie comme dans de nombreuses spécialités médicales.

En effet, l'avènement de nouveaux dispositifs alliant réalité virtuelle et dispositif haptique permettant de simuler au plus juste les gestes techniques de l'odontologie, laisse entrevoir la possibilité d'évaluer plus objectivement les compétences des futurs Chirurgiens-Dentistes et de renforcer la formation traditionnelle.

Au travers de différentes expérimentations pédagogiques dans les domaines de l'implantologie, de la dentisterie restauratrice et de la chirurgie orale, nous avons voulu :

- (i) évaluer l'impact de la simulation haptique sur la formation en odontologie en nous focalisant sur l'implantologie et la dentisterie restauratrice.
- (ii) définir de nouveaux paramètres pédagogiques pour essayer de les évaluer objectivement et estimer l'importance de la vision 3D en simulation.

Mots clés :

Recherche pédagogique, Odontologie, Simulateur haptique, Implantologie, Parodontologie

Abstract :

The rapid development of new digital technologies is revolutionizing the classical teaching of dentistry as in many medical specialties.

Indeed, the advent of new devices combining virtual reality with a haptic device allowing to simulate the technical gestures of odontology, suggests the possibility to evaluate the skills of future Dentists more objectively and to strengthen traditional training.

Through various educational experiments in the fields of implantology, restorative dentistry and oral surgery, we wanted to:

- (i) assess the impact of haptic simulation on odontology training by focusing on implantology and restorative dentistry.
- (ii) define new objectively evaluable pedagogical parameters and to estimate the importance of 3D vision in simulation.

Keywords :

Educational Research, Training, Odontology, Haptic simulation, Implantology, Periodontology