



HAL
open science

La réalité virtuelle dans l'enseignement préclinique en Dentisterie Restauratrice : le simulateur haptique VirTeaSy Dental© est-il un outil discriminant et valide pour apprécier les performances des étudiants ?

Marthe Mauroux

► To cite this version:

Marthe Mauroux. La réalité virtuelle dans l'enseignement préclinique en Dentisterie Restauratrice : le simulateur haptique VirTeaSy Dental© est-il un outil discriminant et valide pour apprécier les performances des étudiants ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-02496233

HAL Id: dumas-02496233

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02496233v1>

Submitted on 2 Mar 2020

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.

U.F.R. des Sciences Odontologiques

Année 2020

Thèse n°14

THESE POUR L'OBTENTION DU

DIPLOME D'ETAT de DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

Par MAUROUX Marthe

Née le 21/10/1989 à Limoges

Le mardi 18 février 2020

**La réalité virtuelle dans l'enseignement préclinique en
Dentisterie Restauratrice : le simulateur haptique VirTeaSy
Dental© est-il un outil discriminant et valide pour apprécier
les performances des étudiants ?**

Sous la direction de : Olivia KEROUREDAN

Membres du jury :

Président
Directeur
Rapporteur
Assesseur

Mme BERTRAND Caroline
Mme KEROUREDAN Olivia
M PELI Jean-François
Mme DESCAZEUX Séverine

Professeur des Universités
Maître de Conférences des Universités
Maître de Conférences des Universités
Assistant Hospitalo-Universitaire

UNIVERSITE DE BORDEAUX

MAJ
02/12/2019

Président M. TUNON DE LARA Manuel

Directeur de Collège des Sciences de la Santé M. PELLEGRIN Jean-Luc

COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DES SCIENCES ODONTOLOGIQUES

Directrice	Mme BERTRAND Caroline	58-01
Directeur Adjoint à la Pédagogie	Mr DELBOS Yves	56-01
Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche	M. CATROS Sylvain	57-01
Directeur Adjoint – Chargé des Relations Internationales	M.SEDARAT Cyril	57-01

ENSEIGNANTS DE L'UFR

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mme Caroline	BERTRAND	Prothèse dentaire	58-01
Mme Marie-José	BOILEAU	Orthopédie dento-faciale	56-01
M Sylvain	CATROS	Chirurgie orale	57-01
M Raphaël	DEVILLARD	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
Mme Véronique	DUPUIS	Prothèse dentaire	58-01
M. Bruno	ELLA NGUEMA	Sciences anatomiques et physiologiques - Biomatériaux	58-01
M. Jean-Christophe	FRICAIN	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme Elise	ARRIVÉ	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme Cécile	BADET	Biologie Orale	57-01
M. Etienne	BARDINET	Orthopédie dento-faciale	56-01
M. Michel	BARTALA	Prothèse dentaire	58-01
M. Cédric	BAZERT	Orthopédie dento-faciale	56-01
M. Christophe	BOU	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme Sylvie	BRUNET	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01
M. Jacques	COLAT PARROS	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M. Jean-Christophe	COUTANT	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M. François	DARQUE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M. François	DE BRONDEAU	Orthopédie dento-faciale	56-01
M. Yves	DELBOS	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Emmanuel	D'INCAU	Prothèse dentaire	58-01
Mme Elsa	GAROT	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Dominique	GILLET	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
Mme Olivia	KEROUREDAN	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
M. Jean-François	LASSERRE	Prothèse dentaire	58-01
M. Yves	LAUVERJAT	Parodontologie	57-01
Mme Odile	LAVIOLE	Prothèse dentaire	58-01
M. Jean-Marie	MARTEAU	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01
Mme Javotte	NANCY	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Adrien	NAVEAU	Prothèse dentaire	58-01

M.	Jean-François	PELI	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
M.	Philippe	POISSON	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
M.	Patrick	ROUAS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Johan	SAMOT	Biologie Orale	57-01
Mme	Maud	SAMPEUR	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Cyril	SEDARAT	Parodontologie	57-01
Mme	Noëlie	THEBAUD	Biologie Orale	57-01
M.	Eric	VACHEY	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01

AUTRES ENSEIGNANTS

Mme	Audrey	AUSSEL	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M.	Cédric	FALLA	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
M.	François	ROUZÉ L'ALZIT	Prothèse dentaire	58-01

ASSISTANTS

Mr	Bastien	BERCAULT	Chirurgie Orale	57-01
Mme	Mathilde	BOUDEAU	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Walid	BOUJEMAA AZZI	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Melle	Camille	BOULÉ-MONTPEZAT	Odontologie pédiatrique	56-01
Mlle	Anais	CAVARE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M	Hubert	CHAUVEAU	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Virginie	CHUY	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
M	Pierre-Hadrien	DECAUP	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Severine	DESCAZEAX	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Julia	ESTIVALS	Odontologie pédiatrique	56-01
Mme	Mathilde	FENELON	Chirurgie Orale	57-01
Mme	Agathe	GREMARE	Biologie orale	57-01
Mr	Louis	HUAULT	Fonction/dysfonctions, imagerie, biomatériaux	58-01
Mme	Mathilde	JACQUEMONT	Parodontologie	57-01
Mme	Clémence	JAECK	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Claudine	KHOURY	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Camille	LACAULE	Orthopédie dento-faciale	56-01
Mr	Antoine	LAFITTE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M	Adrien	LASTRADE	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Aude	MENARD	Prothèse dentaire	58-01
M	Florian	PITEU	Prothèse dentaire	58-01
M	Antoine	PEPELUT	Parodontologie	57-01
Mr	Thibaut	ROULLAND	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Rawen	SMIRANI	Parodontologie	57-01
Mr	Clément	VACHEY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M	Paul	VITIELLO	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Sophia	ZIANE	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

Remerciements

A notre Présidente de thèse

Madame le Professeur Caroline BERTRAND

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques

Département Prothèses 58-02

Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Ce travail exprime ma sincère reconnaissance et mon respect pour la qualité de votre enseignement.

A notre Directeur de thèse

Madame le Docteur Olivia KEROUREDAN

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Département Dentisterie restauratrice et endodontie 58-01

Je vous adresse mes sincères remerciements pour votre soutien, vos précieux conseils et votre grande disponibilité pour la rédaction de cette thèse.

Je vous suis également très reconnaissante pour votre dévouement et votre accessibilité lors des travaux pratiques et des vacations hospitalières. La bienveillance, la patience et l'écoute dont vous faites preuve sont des valeurs qui me motivent dans l'exercice de la profession. Je pense parler au nom de tous les étudiants de la faculté en disant que vous êtes une pédagogue exceptionnelle et très compréhensive.

Merci d'avoir contribué à ma formation et d'avoir accepté de diriger cette thèse.

A notre Rapporteur de thèse

Monsieur le Docteur Jean-François PELI

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Département Dentisterie restauratrice et endodontie 58-01

Je vous remercie pour la lecture de ce travail et l'intérêt que vous avez porté à son égard.

Merci d'avoir contribué à ma formation et d'avoir accepté de participer à ce jury en tant que rapporteur.

A notre Assesseur

Madame le Docteur Séverine DESCAZEAUX

Assistant Hospitalo-Universitaire

Département Dentisterie restauratrice et endodontie 58-01

Je vous suis reconnaissante pour vos conseils lors de nos vacances hospitalières communes.

Je vous remercie d'avoir accepté de participer à ce jury.

A Madame le Docteur Elise ARRIVE

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Département Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale 56-02

Je vous remercie pour votre aide précieuse pour la réalisation de la partie statistique de ce travail.

Remerciements

A mes parents, merci d'être toujours là pour moi. Quand il y a 7ans j'étais perdue, vous m'avez encouragée et accompagnée tout le long de cette nouvelle voie. Je n'aurais pas pu en arriver là aujourd'hui sans vous. Je suis consciente de la chance que vous m'avez offerte et j'espère que vous serez fiers de ce que j'en ai fait. Je vous aime de tout mon cœur.

A ma sœur, Marie, tu m'as montré ce chemin auquel je n'aurai jamais pensé sans toi. Merci d'être à mes côtés. Quelles que soient nos décisions, je sais que l'on pourra toujours compter l'une sur l'autre. Je t'aime fort.

A mon frère aussi beau, Nicolas, il est gentil, il sent bon mais il est pas comme nous. Mais on le nem fort quand même.

A tout le reste de ma famille, merci pour votre soutien, vos encouragements et votre amour.

A mes vieilles amies, Aurélie et Marie, merci d'être encore et toujours là. Vos amitiés me sont très précieuses.

A mes gazelles, Laetitia, Léa, Lélia et Mathilde, merci pour tous les fous rires, les galères partagées et le positif qu'on arrivait à en sortir, d'avoir supporté tous mes « ça m'agace » et de m'en faire rire, votre écoute et conseils dans les moments moins funs, les nombreux happys et cafés à faire le point potin, les potins... beaucoup de potins ;) Ces 5 années n'auraient pas eu la même couleur sans vous. Vous avez été mes petits rayons de soleil :)

A ma team Kind Regards, Dévi, Johanna, Kildine et Lélia, merci pour tous ses bons moments, nos rires, nos discussions, les fêtes, pour me laisser squatter chez vous quand je ne veux plus vous quitter et surtout pour nos escapades de folie ! J'espère faire le tour du monde avec vous !

A tous mes amis de promotion, Aymeric, Baptiste, Clément, Diane, Emilie, Fred, Gabie et Léa (team Lama), Johanna, Kildine, Laetitia, Laure, Lélia, Mathilde, Nico et Pierre (team Loutre), Vincent, et Yvan et tous les autres, merci pour cette seconde jeunesse avec vous. Peut-être que mon foie ne vous remercie pas, mais mes zygomatiques et ma rate vous adorent.

Une petite dédicace à Vincent pour ta participation active à ma thèse, qui sait quand je l'aurais passée si tu ne m'avais pas traînée à la BU...

A toute l'équipe du cabinet d'Oradour sur Glane, merci de m'avoir si bien accueilli chez vous pour mes débuts d'exercice et de m'avoir fait confiance. Merci de ne pas appliquer le vieux proverbe du sage chinois et de toujours me conseiller.

A tous les participants au travail de cette thèse, je tiens à vous remercier pour m'avoir dédié un peu de votre temps, ainsi que Benoît Cros pour sa disponibilité.

A Manon, Lénora et Titou,

TABLE DES MATIERES

I. Introduction	11
1) Importance de l'acquisition du geste et recours à la simulation en Santé	11
2) Les mécanismes d'apprentissage du geste et de la dextérité	13
3) L'évolution de l'enseignement préclinique en odontologie	15
1. Les méthodes traditionnelles en pédagogie préclinique d'odontologie	15
2. Les simulateurs physiques de seconde génération	17
a) La robotique	17
b) La simulation assistée par ordinateur	17
3. Les simulateurs virtuels à technologie haptique	19
4) L'apport de la simulation haptique dans l'enseignement préclinique en odontologie	19
1. Généralités	19
2. Les différents simulateurs	21
3. Avantages	21
4. Inconvénients	23
5. Apport de la simulation dans l'enseignement préclinique en odontologie	25
5) Objectifs de l'étude	27
II. Matériels et méthodes	28
1) Le simulateur VirTeaSy©	28
1. Présentation générale	28
2. Présentation des composants	28
a) Le bras haptique	28
b) Les lunettes 3D	29
c) La souris 3D	29
d) La pédale	29
e) Le manipulateur seconde main ou miroir	29
3. Présentation de l'interface	30
4. Présentation des différents exercices proposés	31
2) Groupes de participants à l'étude	32
3) Déroulement de l'exercice	33
4) Analyse des résultats : valeurs étudiées	36

5) Questionnaire _____	37
6) Analyse statistique _____	38
III. Résultats _____	38
1) Comparaison des différentes valeurs étudiées entre les groupes pour le premier essai __	38
2) Comparaison des différentes valeurs étudiées entre les groupes pour le deuxième essai _	40
3) Comparaison des différentes valeurs étudiées entre les groupes pour le troisième essai _	41
4) Comparaison du taux de progression entre les groupes _____	43
5) Comparaison des résultats du questionnaire entre les groupes _____	43
IV. Discussion _____	48
1) Autour des résultats obtenus _____	48
2) Autour du rôle de la réalité virtuelle dans l'enseignement préclinique en odontologie ____	50
3) Autour des futurs axes de recherche _____	52
V. Conclusion _____	53
VI. Bibliographie _____	54

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Les premiers simulateurs dans le domaine médical	12
Figure 2 : Des simulateurs à réalité virtuelle dans le domaine médical (Escobar et al. 2016)	13
Figure 3: Schéma du premier simulateur fantôme créé par Oswald Fergus (Escobar et al. 2016)	15
Figure 4 : Dents Frasaco®	16
Figure 5 : Le patient robot Dentaroid®	17
Figure 6 : Le simulateur DentSimTM (Buchanan et al. 2001)	18
Figure 7 : Ecran d'évaluation de DentSimTM (Buchanan et al. 2001)	18
Figure 8 : Le simulateur VirTeaSy© disponible à la faculté d'Odontologie de Bordeaux	28
Figure 9 : Les composants du VirTeaSy©	30
Figure 10 : Accueil de l'interface du logiciel VirTeaSy©	31
Figure 11 : Les exercices	32
Figure 12 : Installation ergonomique des étudiants	33
Figure 13 : Sélection de l'exercice n°1 de la thématique Odontologie Conservatrice	34
Figure 14 : La trousse Henry Schein mise à disposition pour l'exercice	35
Figure 15 : Lancement de l'exercice	35
Figure 16 : Evaluation à la fin de l'exercice	36
Figure 17 : Questionnaire remis aux étudiants à la fin de leur expérience	37
Figure 18 : Comparaison du pourcentage moyen de volume intérieur – Essai 1	38
Figure 19 : Comparaison du pourcentage moyen de volume extérieur – Essai 1	39
Figure 20 : Comparaison du pourcentage moyen de la différence entre les volumes intérieur et extérieur – Essai 1	39
Figure 21 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume intérieur – Essai 2	40
Figure 22 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume extérieur – Essai 2	40
Figure 23 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de différence entre les volumes intérieur et extérieur – Essai 2	41
Figure 24 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume intérieur – Essai 3	41
Figure 25 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume extérieur – Essai 3	42
Figure 26 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de différence entre les volumes intérieur et extérieur – Essai 3	42
Figure 27 : Comparaison du taux de progression entre les groupes	43
Figure 28 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 1	44
Figure 29 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 2	44
Figure 30 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 3	45
Figure 31 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 4	45

<i>Figure 32 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 5</i>	46
<i>Figure 33 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 6</i>	46
<i>Figure 34 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 7</i>	47
<i>Figure 35 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 8</i>	47
<i>Figure 36: Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 9</i>	48

TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Comparaison des simulateurs Simodont®, PerioSim© et VirTeaSy Dental©</i>	21
<i>Tableau 2 : Comparaison des avantages et inconvénients entre le simulateur virtuel VirTeaSy Dental© et un simulateur physique ou fantôme</i>	24

I. Introduction

1) Importance de l'acquisition du geste et recours à la simulation en Santé

Le principe actuel de l'enseignement médical s'appuie sur l'articulation entre l'assimilation de connaissances et l'acquisition de compétences, renforcée par le modèle « see one, do one, teach one » (en français, « Observe, pratique, apprend ») décrit en 1904 par William Halstead.¹ La succession d'une étape d'observation d'un geste ou d'une technique et d'une étape de réalisation pratique en conditions réelles est une séquence largement acceptée et utilisée pour l'apprentissage dans la formation médicale. L'étape d'observation peut être un cours, une revue de littérature ou une formation de pratique clinique. Une fois les techniques observées, les étudiants doivent les reproduire avec un encadrement garantissant l'absence de risques pour les patients.²

La dentisterie inclut une large gamme d'actes, chacun demandant des compétences spécifiques à une tâche.³ Le développement des compétences cliniques requiert l'assimilation de savoirs combinée avec l'acquisition d'une dextérité clinique et d'une faculté à résoudre les problèmes cliniques.⁴ L'entraînement clinique en odontologie est basé sur une pratique constante et régulière pour acquérir et renforcer ces compétences motrices.⁵

Classiquement, l'enseignement préclinique pratique pour les étudiants en Odontologie est constitué d'une combinaison de l'enseignement théorique et des travaux pratiques. Suite à cet apprentissage, l'étudiant se retrouve confronté à ses premiers patients alors qu'il n'a pas encore acquis toutes ses compétences cliniques. Actuellement, la formation en clinique suit une approche d'apprentissage qui consiste à superviser les étudiants qui interagissent avec les patients. Malheureusement, cette méthode peut parfois confronter le patient à de l'inconfort, des risques de complications et à des traitements de durée prolongée.² En effet, l'apprentissage dans les disciplines médicales doit, à un moment donné ou un autre, impliquer de réels patients pour permettre aux futurs professionnels de santé de perfectionner leurs compétences. Toutefois, il reste une obligation de pourvoir un traitement optimal et d'assurer le bien-être et la sécurité de ces patients. La balance entre ces deux besoins représente une tension éthique fondamentale dans la formation médicale. L'apprentissage basé sur la simulation peut aider à mitiger cette tension en développant les savoirs, comportements et compétences des professionnels de santé, tout en protégeant les patients d'un risque.⁶

La Haute Autorité de Santé définit la simulation en santé par « 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, pour enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et permettre de répéter des processus, des situations cliniques ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels ».⁷

Historiquement, le premier simulateur médical a été créé au 18^{ème} siècle par la sage-femme Madame du Coudray (Figure 1A). Elle a mis au point un mannequin destiné à simuler les accouchements dans l'optique d'en enseigner la pratique et ainsi diminuer la mortalité infantile.⁸ En 1911, Martha Jenkins Chase (une créatrice de poupée) crée le premier mannequin en bois à taille humaine « Madame Chases » pour les élèves infirmiers de l'hôpital Hartford (Figure 1B). Ce mannequin permet aux futures infirmières d'apprendre comment habiller, manipuler et transférer les patients.^{8,9} En 1914, une version améliorée, Arabella, apprend aux élèves à pratiquer des injections.⁹ En médecine, l'anesthésie a été la pionnière dans le champ de la simulation à haute-fidélité. Un des premiers simulateurs en anesthésie était le Sim One© (Figure 1C), développé par Sierra Engineering Company dans les années 1960.⁹ C'est le premier mannequin contrôlé par ordinateur, recréant des conditions d'une anesthésie au bloc opératoire. Il possédait des caractéristiques impressionnantes pour l'époque (pulsations cardiaques, clignement des yeux, ouverture/fermeture de la mandibule, réponses physiologiques à l'administration de substances médicamenteuses).

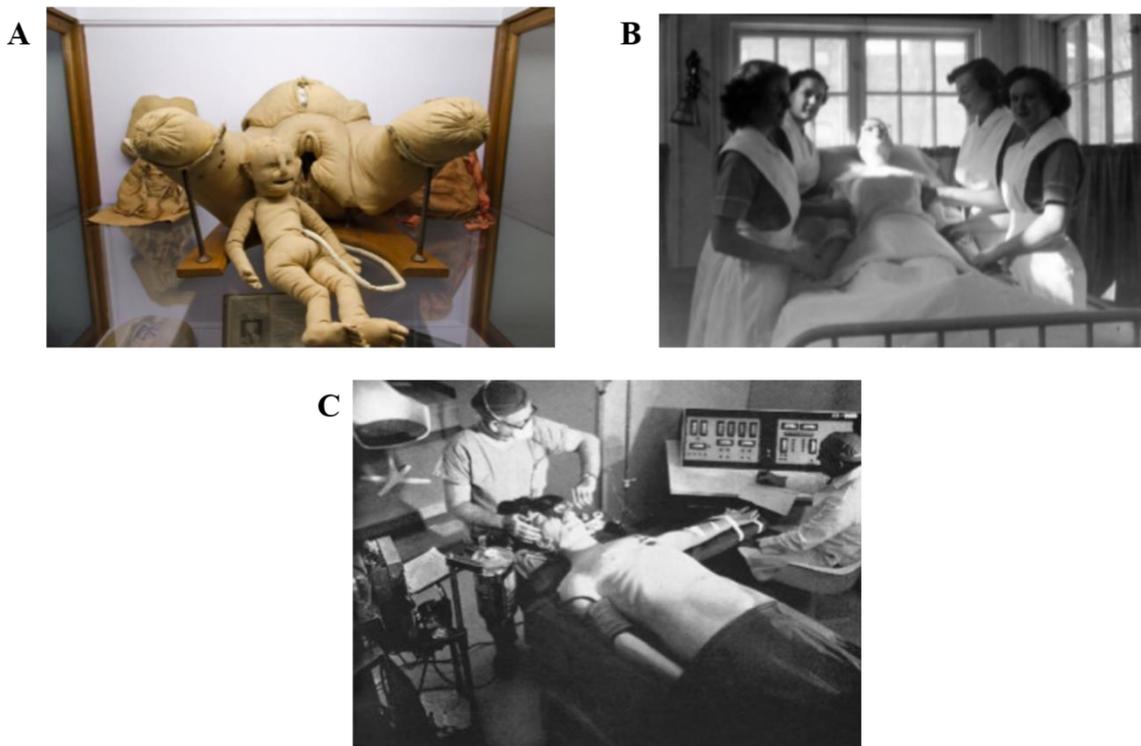


Figure 1 : Les premiers simulateurs dans le domaine médical
A : Le simulateur d'accouchement de Mme de Coudray
B : Le mannequin Madame Chases pour les infirmières
C : Le Sim One©, le premier mannequin informatisé

Dans les années 90, la création des bras haptiques (ou bras à retour de force) annonce l'ère de la simulation par réalité virtuelle. De nombreux simulateurs sont apparus dans différents domaines médicaux comme la cardiologie, les soins intensifs et la chirurgie.⁹ Par exemple, Ullrich et Kuhlen ont

décrit un simulateur pour la palpation (Figure 2A). Sa souris de palpation légère offre une configuration de pose des doigts dans les tâches de palpation très réaliste.¹⁰ Delorme *et al.* ont développé le simulateur virtuel NeuroTouch® pour la pratique de microchirurgies crâniennes (Figure 2B). Il permet aux internes de s'entraîner aux tâches de réduction ou de cautérisation de tumeurs.¹¹ De nos jours, plusieurs compagnies produisent des mannequins à haute-fidélité sophistiqués et offrant des options répondant aux attentes des étudiants et des professionnels de santé. Des simulateurs ont aussi été développés pour d'autres professions tels que les dentistes et les vétérinaires.⁹ Les études ont ensuite démontré que cette technologie était utile, prouvant que le gain de compétences motrices acquis sur simulateur de réalité virtuelle pouvait être transféré dans un cadre réel.³

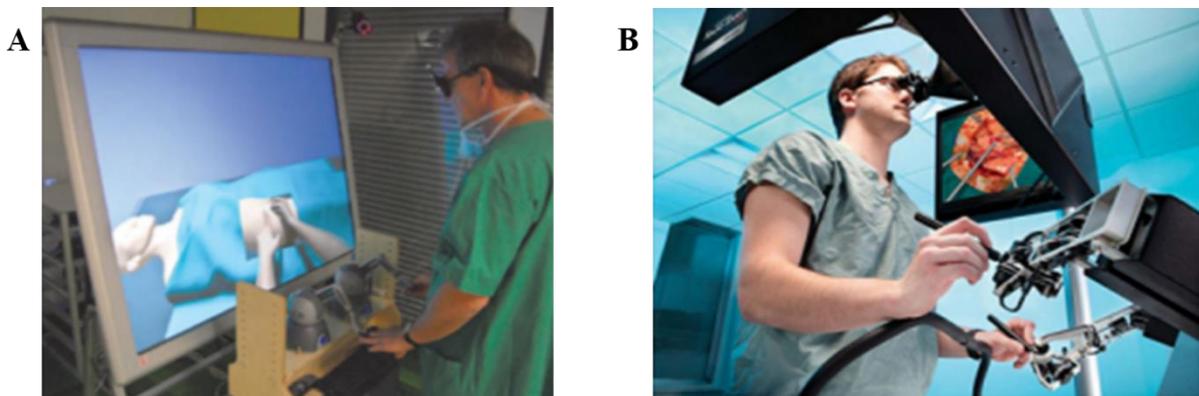


Figure 2 : Des simulateurs à réalité virtuelle dans le domaine médical (Escobar et al. 2016)

A : Le simulateur pour la palpation de Ullrich et Kuhlen

B : Le simulateur NeuroTouch®

Dans le domaine de l'odontologie, les simulateurs physiques ont été longtemps la référence dans l'entraînement préclinique permettant l'acquisition de la dextérité manuelle. Dans les années 2000, les simulateurs virtuels sont apparus dans différentes sections telles que l'odontologie restauratrice, la parodontologie¹², l'endodontie¹³, l'implantologie¹⁴ et la chirurgie maxillo-faciale¹⁵.

L'acquisition d'une dextérité et de gestes cliniques sont indispensables au futur dentiste. Elle passe par une phase d'apprentissage et de mémorisation du geste. Quelques notions de neurologie sont indispensables à la bonne compréhension des mécanismes d'apprentissage du geste et de la dextérité.

2) Les mécanismes d'apprentissage du geste et de la dextérité

La maîtrise des gestes est la capacité à effectuer ces gestes automatiquement, libérant ainsi sa pensée pour la réflexion. Les noyaux gris centraux du cerveau sont le support de l'automatisme des mouvements.

Une telle maîtrise des gestes est indispensable au clinicien qui examine un patient, au chirurgien qui mène une intervention, à tous ceux qui doivent prodiguer des soins complexes, y compris les gestes d'urgence. Acquérir cette maîtrise requiert d'abord un temps d'apprentissage (d'autant plus long que le geste est complexe), puis une pratique régulière pour maintenir son exécution dans la mémoire.¹⁶

Deux types de mémoire interviennent simultanément, de façon harmonieuse dans la mémorisation des gestes : la mémoire procédurale (ou mémoire des automatismes) pour l'exécution des gestes et la mémoire sémantique (ou mémoire du langage et de la connaissance sur le monde et sur soi) pour l'enchaînement des séquences de gestes.¹⁶ Lors de la réalisation de geste, l'utilisation d'objets dépend du savoir sémantique sur la relation usuelle objet-outil (par exemple un marteau est associée à un clou) et sur la fonction des outils (par exemple un marteau et un maillet ont la même fonction).¹⁷

L'apprentissage par imitation est inné et a pour support neurophysiologique les neurones miroirs, neurones sensori-moteurs qui sont activés lors de l'observation d'un sujet qui effectue un mouvement ou le simule. L'apprentissage par imitation est un échange entre élève et instructeur qui requiert :

- que l'élève ait compris l'objectif du geste,
- que l'élève anticipe qu'il devra effectuer ensuite ce geste sous le contrôle de l'instructeur,
- que l'instructeur effectue d'abord le geste en temps réel, puis le répète au ralenti (éventuellement en le décomposant et en donnant des explications si nécessaires),
- que l'élève observe attentivement la réalisation du geste, activant ses neurones miroirs,
- que l'élève effectue ensuite le geste sous le contrôle de l'instructeur qui identifie les malfaçons et fait reprendre le geste à l'élève,
- dans l'idéal, au terme de la séance de formation, l'élève est capable d'exécuter correctement le geste.¹⁶

Le concept théorique du *scaffolding* décrit cette relation d'apprentissage entre l'élève et un expert (ou pair qualifié) et l'évolution de celle-ci au fur et à mesure que l'apprenti devient indépendant.^{18,19}

Deux techniques complémentaires peuvent être utilisées pour entretenir la mémorisation : la répétition et l'imagerie mentale. L'imagerie mentale est l'action consciente d'imaginer, de façon systématique et répétée, des objets (ou mouvements) sans les voir ni les utiliser physiquement, dans le but d'augmenter sa performance.²⁰ La répétition mentale isolée et le mime qui associe une gestuelle à la répétition mentale constituent l'imagerie mentale. Comme elle ne nécessite pas d'environnement physique, elle peut être pratiquée à la convenance du sujet n'importe où et n'importe quand. Elle permet d'augmenter le nombre de répétitions d'une manière sûre et autonome sans fatigue physique excessive, ou de répéter des tâches motrices exigeantes et complexes quand la pratique physique est impossible ou trop difficile. Il semblerait que la pratique de l'imagerie mentale en amont d'une pratique physique serait plus efficace

dans l'acquisition de nouvelles compétences motrices qu'une pratique mentale seule ou qu'une pratique physique seule, mais que cet entraînement mental doit être intensif.²¹

Faire et refaire les mêmes gestes est une nécessité pour qu'ils soient mémorisés durablement de façon parfaite. Dans certains domaines, l'entraînement s'effectue en partie sur simulateur. Nombre d'études ont montré que la pratique de l'image mentale améliore les performances.^{16,18}

Après avoir vu l'importance de l'apprentissage du geste clinique et ses mécanismes dans le domaine de médical, il est maintenant important de se recentrer sur l'odontologie et développer les techniques d'apprentissage du geste clinique dans l'enseignement préclinique en odontologie.

3) L'évolution de l'enseignement préclinique en odontologie

1. Les méthodes traditionnelles en pédagogie d'odontologie

Le premier collège de Chirurgie d'Odontologie a été fondé en 1840 à Baltimore (Ohio, Etats-Unis). L'enseignement des techniques restauratrices à cette époque était pratiqué sur des dents naturelles extraites et sur pailleasse. Le manque de disponibilité de dents naturelles humaines est très rapidement devenu problématique, du fait que ces dernières étaient notamment utilisées pour la confection de dentiers.³ Les premiers « fantômes » sont apparus en 1894, créés par Oswald Fergus, dans le but d'augmenter le réalisme.^{3,22,23} Ils étaient constitués d'une barre en métal et de 2 mâchoires en laiton (Figure 3).

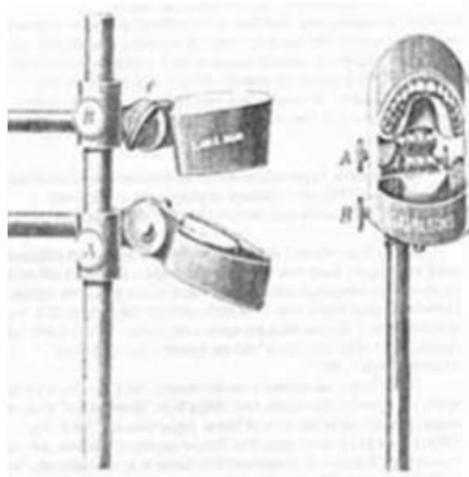


Figure 3: Schéma du premier simulateur fantôme créé par Oswald Fergus (Escobar et al. 2016)

Le simulateur physique fantôme est devenu la référence et le dispositif de simulation de base dans l'enseignement en odontologie depuis sa création. Il offre de nombreux avantages : l'ergonomie est

respectée et il permet une manipulation correcte de la pièce à main et du miroir. Les points d'appui peuvent également être respectés lors de la manipulation des instruments, ce qui est un concept fondamental à acquérir pour le novice lors de son apprentissage.³ Les fantômes constituent une méthode efficace pour enseigner les techniques opératoires précliniques aux étudiants sans danger tout en augmentant considérablement leurs compétences motrices.^{23,24}

Les principaux problèmes des dents naturelles extraites sont l'approvisionnement et la reproductibilité. En effet chaque dent étant unique, il peut être difficile d'évaluer de façon objective les compétences de plusieurs étudiants.^{8,22} A la fin du XX^e siècle, quand l'enseignement en odontologie s'est rapidement développé et que l'approvisionnement en dents naturelles était limitée, les dents en résines se sont largement démocratisées.³ Actuellement, les dents en résine (type Frasco®) insérées sur un modèle de travail appelé « typodont », lui-même monté sur un fantôme, constituent une méthode d'apprentissage très répandue. Ce système a cependant de nombreuses limites : l'aspect et la densité (souvent homogènes) des dents en résine ne reflètent que partiellement la réalité clinique (pas de carie, anatomie standardisée non modifiable), leur prix est élevé et leur processus de fabrication engendre une pollution environnementale.^{8,22,25} Certains fournisseurs ont complété leur offre en développant des dents en résine spécifiques. Par exemple la société Frasco® propose des dents anatomiques 3 couches « émail-dentine-pulpe » avec une distinction claire de couleur entre les trois couches. Des dents avec infiltration carieuse avec une cible noire représentant la carie, ainsi que des dents anatomiques 3 couches avec lésions carieuses existent (Figure 4). Ces dents sont un outil pédagogique intéressant dans l'approche des différents tissus dentaires, mais ici la distinction entre les tissus n'est que visuelle et non tactile. Les sociétés Frasco® et RightNao® proposent également des dents avec un réseau pulpaire pour l'apprentissage de la préparation canalaire en endodontie (Figure 4). Cependant à l'heure actuelle en Odontologie Restauratrice, il n'est pas encore proposé de dents synthétiques simulant les différences tactiles des divers tissus des dents naturelles, ce qui permettrait aux étudiants d'augmenter leurs compétences motrices. Ceci pourrait être un défi pour les divers fournisseurs en dents synthétiques.¹

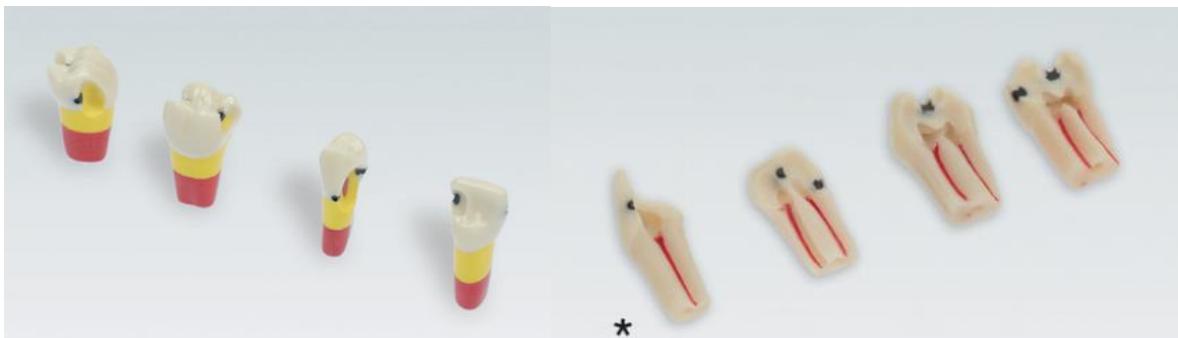


Figure 4 : Dents Frasco®

A gauche les dents Frasco® anatomiques à 3 couches avec lésion carieuse. A droite : dents Frasco® pour exercice d'endodontie avec infiltration carieuse.

Source : https://www.frasaco.de/kataloge/Lieferprogramm_2018_fr/#18

Avec les progrès de l'informatique et du numérique sont ensuite apparus des simulateurs physiques de seconde génération.

2. Les simulateurs physiques de seconde génération

a) La robotique

Un mannequin haute-fidélité (Dentaroid®) a été développé en 2011 pour l'Odontologie à l'école de Showa au Japon en partenariat avec Tmusk CO.Ltd (Fukuoka, Japon). Le patient robot Dentaroid® (Nissan©) est d'apparence féminine et mesure 157cm. Il comporte 8 degrés de liberté au niveau de la tête et peut réaliser des mouvements autonomes. La salive, la parole, ainsi que les mouvements de déglutition de la langue, allant jusqu'au réflexe nauséux, peuvent être simulés sur ce patient.^{3,22,26} (Figure 5)

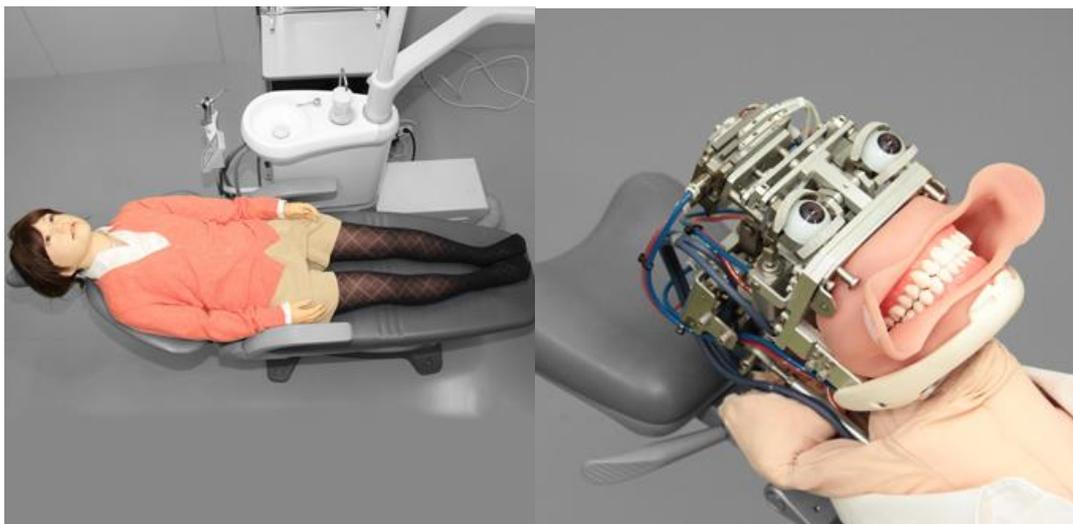


Figure 5 : Le patient robot Dentaroid®

Source : [http://www.nissin-](http://www.nissin-dental.net/products/DentalTrainingProducts/DentalSimulator/dentaroid/index.html)

[dental.net/products/DentalTrainingProducts/DentalSimulator/dentaroid/index.html](http://www.nissin-dental.net/products/DentalTrainingProducts/DentalSimulator/dentaroid/index.html)

b) La simulation assistée par ordinateur

La simulation virtuelle assistée par ordinateur a fait son apparition dans les écoles d'odontologie américaines et européennes au début des années 2000, devenant une nouvelle piste dans l'apprentissage des compétences motrices. Des dents virtuelles générées par ordinateur étaient utilisées en complément de divers dispositifs pour simuler le contrôle de la pièce à main, tels que des joysticks et stylet. Un des premiers systèmes qui offrait une variété d'exercices d'entraînement était DentSim™ (DenX, Jérusalem,

Israël). Son avantage est qu'il combine un apprentissage basé sur un mannequin et une vision 3D. DentSim™ est composé d'un mannequin simulant le patient avec une tête et des modèles typodonts, une pièce à main, une caméra à infrarouge et deux ordinateurs (Figure 6). Le réalisme est renforcé par la présence des points d'appui, du spray à eau et de la pièce à main. La tête du mannequin et la pièce à main contiennent des émetteurs à infrarouge ce qui permet à la caméra infrarouge de détecter leur orientation dans l'espace. Pendant que l'étudiant prépare sa dent sur le mannequin, l'ordinateur peut créer une image virtuelle sur l'ordinateur de la dent en train d'être préparée. La dent virtuelle peut alors être comparée à la préparation idéale approuvée par la faculté et un retour visuel détaillé peut être donné ainsi qu'une note (Figure 7).^{3,24,27,28}



Figure 6 : Le simulateur DentSim™ (Buchanan et al. 2001)

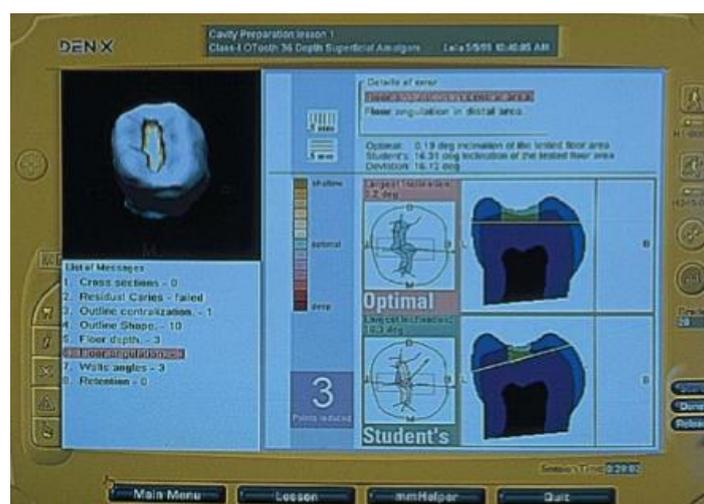


Figure 7 : Ecran d'évaluation de DentSim™ (Buchanan et al. 2001)
L'image virtuelle de la préparation de l'étudiant se trouve en haut à gauche. Sur le côté droit, la préparation de l'étudiant est comparée à une préparation idéale²⁷

Enfin, le développement de la réalité virtuelle a engendré la création de simulateurs virtuels, utilisant une nouvelle technologie, la technologie haptique.

3. Les simulateurs virtuels à technologie haptique

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.²² Le « toucher » en général fait référence à toutes les perceptions ressenties par les contacts peauciers, telles que la température, les vibrations, les différences de textures. Les « phénomènes kinesthésiques » permettent de situer les membres de notre corps en temps réel dans l'espace. C'est la perception de soi-même dans l'environnement.⁸

En simulation, les simulateurs haptiques sont des dispositifs permettant de retranscrire la sensation de toucher, de fournir un retour de force. Il s'agit de faire ressentir une réalité virtuelle ou un véritable objet situé à distance de façon indirecte.²² 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. Ces dispositifs électromécaniques avec manipulateurs sont caractérisés par leur degré de liberté.²⁹

La technologie haptique comprend deux éléments essentiels à son bon fonctionnement :

- un système haptique : composé de capteurs, il envoie les informations des mouvements de l'utilisateur au système de commande ;
- un système de commande et de traitement : il traite les informations liées aux mouvements de l'utilisateur et les croise avec les données du système pour créer par algorithme le retour de force.

Ce retour de force est renvoyé au système haptique, et ressenti par l'utilisateur : c'est le rendu haptique.⁸

Ces simulateurs virtuels à technologie haptique présentent un intérêt de plus en plus reconnu dans l'enseignement préclinique en odontologie.

4) L'apport de la simulation haptique dans l'enseignement préclinique en odontologie

1. Généralités

La dentisterie restauratrice est une procédure extrêmement tactile avec des différences de sensations entre le fraisage de l'émail et de la dentine. Une sensibilité accrue est également requise pour progresser

dans le tissu pulpaire. A partir de technologies développées en industrie aéronautique et en médecine chirurgicale, des prototypes de simulateurs dentaires haptiques ont été élaborés, menant à la mise en place des premiers simulateurs haptiques dentaires dans les écoles d'odontologie au début des années 2000.³

Comme vu précédemment, ces simulateurs 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.²²

Deux types de matériels informatiques (hardwares) sont nécessaires pour un simulateur dentaire multisensoriel :

- une plateforme multisensorielle ergonomique apportant une interaction facile et immersive entre l'opérateur humain et l'environnement virtuel ;
- des dispositifs haptiques de haute performance permettant un retour de force stable et de haute-fidélité dans la main de l'opérateur.

Le logiciel est l'élément clé du simulateur dentaire. La fonction du logiciel est double :

- créer un environnement virtuel comprenant des dents virtuelles, des instruments dentaires virtuels et des tissus virtuels dans l'environnement buccal ;
- fournir des algorithmes simulant une interaction en temps réel entre divers instruments virtuels et les tissus oraux virtuels avec une haute-fidélité haptique visuelle et auditif.

Un logiciel à visée pédagogique bien conçu devrait offrir des fonctions complètes, des protocoles d'apprentissage progressifs, l'enseignement de l'usage des instruments, des exercices de dextérité manuelle, des exercices de coordination œil-main, l'enregistrement et la rediffusion des sessions d'entraînement, etc.²⁵

2. Les différents simulateurs

Voici un tableau comparatif de trois simulateurs haptiques sur le marché en Odontologie ^{3,25} (Tableau 1) :

	Simodont® (2009, Pays Bas)	PerioSim© (2009, USA)	VirTeaSy Dental© (2011, France)
Section ciblée	Endodontie Prothèse	Parodontologie	Endodontie Prothèse Implantologie
Type d'opération	Fraisage, curetage de caries, restauration de cavité Préparation pour couronnes et bridges	Sondage de poches, détection et retrait de tartre, détartrage et surfaçage	Fraisage, curetage de caries Préparation pour couronnes Pose d'implants
Fonctions	Sélectionner des profils de patients virtuels Exercices de dextérité manuelle	Apprentissage de la sélection et manipulation correctes des divers instruments dentaires	Préparation aux chirurgies Réalisation de chirurgies
Feedback	Haptique, visuel et auditif	Haptique, visuel et auditif	Haptique, visuel et auditif
Contrôle du fraisage virtuel	Pédale au pied	Non	Pédale au pied
Point d'appui digital	Fixation au poignet	Non	Oui
Evaluation automatique	Oui	Oui	Oui
Tissus buccaux et outils	Bouche Dents (émail, dentine, pulpe, tissus carieux) Miroir	Arcades dentaires supérieure et inférieure Segments tétradentaire Os Gencive Dents Tartre	Joues Langue Gencive Dents (émail ; dentine, tissus carieux) Miroir

Tableau 1 : Comparaison des simulateurs Simodont®, PerioSim© et VirTeaSy Dental©

3. Avantages

La simulation virtuelle devient de plus en plus utilisée dans les facultés d'odontologie à travers le monde. Voici les avantages qu'elle apporterait par rapport aux techniques traditionnelles pédagogiques :

- Une autonomie pour les étudiants

Les étudiants peuvent travailler en véritable autonomie grâce à la consultation de contenus théoriques mis en ligne par les enseignants et à l'auto-évaluation proposée.^{4,8} Ils ont un accès illimité au contenu et

un retour sur leur travail immédiat et objectif.^{4,5} Cette autonomie pourrait répondre au nombre croissant d'étudiants dans les facultés qui n'est pas forcément proportionnel au nombre d'enseignants.^{4,8,29}

- Une augmentation du réalisme

Le réalisme est augmenté par rapport aux dents type typodonts.⁸ Les étudiants apprennent un usage précis et correct des instruments rotatifs, du miroir, des sondes et instruments de chirurgie mineurs, en gardant une position ergonomique appropriée.⁴ Les entraînements peuvent se dérouler en vision directe et indirecte, et l'orientation dans l'espace est incorporé.

- Le renforcement de la pratique préclinique

Les étudiants peuvent appliquer les concepts théoriques à une pratique préclinique par une expérience clinique simulée. Ils perçoivent cette opportunité comme un cours plus proche de la clinique en odontologie, leur apportant une perception positive de leur travail. Dans cette lignée, certains simulateurs tels que le VirTeaSy© permettent aux étudiants de s'initier à une nouvelle discipline : l'implantologie. Dans le programme actuel, les cours théoriques ne sont vraiment abordés qu'à partir de la 5^{ème} année et les travaux pratiques qu'en 6^{ème} année. Il n'y a donc pas de corrélation temporelle entre les cours et la pratique. Grâce au module implantologie des simulateurs, il serait possible de commencer l'initiation des étudiants plus tôt, et de la coupler directement avec des planifications ou des poses d'implants virtuels.⁸

- Une évaluation objective

Le simulateur virtuel, grâce à un système de calcul et d'évaluation standardisée, offre aux étudiants un retour totalement objectif sur leurs travaux, qu'ils ne peuvent contester. Par rapport aux dents naturelles extraites, les biais dus aux différences d'anatomies entre les dents des étudiants sont éliminés.^{5,8,30}

- Une réduction des coûts au long terme

Le nombre important de consommables nécessaires à la réalisation des TP, les simulateurs physiques, les différents rotatifs et leurs entretiens engendrent des dépenses importantes auprès des facultés et des étudiants. L'investissement initial des simulateurs virtuels est considérable mais les simulations virtuelles ne demandent pas de coût supplémentaire relatif au consommable et aux instruments. Son utilisation peut également limiter le nombre d'enseignants par rapport aux techniques traditionnelles de TP, ce qui peut être une solution face à la limitation des moyens budgétaires et des effectifs enseignants accordés aux facultés.^{4,8,27}

- Une absence de soucis éthique et sanitaire par rapport aux dents naturelles extraites

La question du consentement éthique pour l'utilisation d'une dent extraite d'un patient peut être posée. Selon le code de santé publique : « Le prélèvement d'éléments du corps humain et la collecte de ses

produits ne peuvent être pratiqués sans le consentement préalable du donneur. » (Article L 1211-2). Pourtant, aucune directive n'est donnée aux étudiants en matière d'acquisition du consentement du patient. Par ailleurs, la collecte de dents naturelles correspondant à celles demandées en travaux pratiques est parfois compliquée. De même, la question sanitaire se pose en endodontie, du fait de la présence de potentiels agents pathogènes sur les dents extraites utilisées. Les simulateurs virtuels ne sont pas concernés par ces questions.^{8,26}

4. Inconvénients

Bien que novatrice et avec de nombreux avantages, la simulation virtuelle a également des inconvénients, tels que :

- Un entraînement préclinique incomplet

Malheureusement actuellement le simulateur virtuel n'offre pas la possibilité d'effectuer toutes les phases opératoires d'un traitement. Par exemple, lors du traitement virtuel d'une carie, l'utilisateur ne pourra simuler que la phase de curetage. Il ne pourra pas simuler la pose de la digue, la pose d'une matrice, la stratification d'un composite et son polissage, et la vérification des critères de réussite. Il en va de même pour chaque discipline où l'utilisation du simulateur physique sera indispensable en complément pour pratiquer certaines techniques.⁸

- La maîtrise de l'auto-évaluation.

L'auto-évaluation objective est un atout du simulateur virtuel, cependant elle peut devenir problématique si elle n'est pas utilisée à bon escient. En effet, il ne faut pas que l'étudiant devienne dépendant de celle-ci au détriment de la réflexion clinique, au risque de ne plus savoir juger son travail de manière objective.⁸

- L'investissement initial.

Un simulateur VirTeaSy© Dental coûte environ 60 000 euros contre 15 000 pour un simulateur physique. L'investissement initial est donc conséquent, mais potentiellement rentable sur le long terme. La maintenance de ces simulateurs semblerait moins coûteuse. Par contre cette maintenance informatique est très pointue et le problème de la formation du personnel universitaire pour celle-ci se pose. Ces systèmes basés sur de la technologie avancée requièrent du personnel expérimenté capable de superviser. En cas de panne, ceci peut d'avérer très problématique. Une collaboration rapprochée avec le fournisseur et la formation d'un des membres du personnel est donc indispensable.^{8,26}

De plus, bien que les simulateurs semblent efficaces et rentables, le rapport coût/bénéfice n'est pas évident à évaluer. Dans une analyse de près de 1000 études évaluant la formation en simulation

médicale, le Docteur Benjamin Zendejas (2013) a noté que « les rapports sur les coûts dans la recherche de la formation médicale basée sur la simulation sont rares et incomplets ». Il poursuit en affirmant que, bien que plus de 90% des programmes d'internat en médecine d'urgence utilisent la technologie de simulation, les preuves définitives manquent pour déterminer si la simulation a un réel impact sur les comportements, les performances ou les compétences cliniques.³¹

Voici un tableau récapitulatif comparant les avantages et inconvénients des deux modèles, simulateur virtuel et simulateur physique (Tableau 2) :

	Simulateur virtuel VirTeaSy©	Simulateur physique traditionnel
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Attrait par les étudiants et renforcement pratique préclinique Autonomie des étudiants dans leur travail Evaluation objective Réalisme augmenté Demande moins d'enseignants : solution à la limitation des effectifs Economique pour les étudiants Absence de soucis éthique et sanitaire 	<ul style="list-style-type: none"> Retour sur expérience datant de nombreuses années Réalisation de toutes les phases opératoires possible Ergonomie plus proche de la réalité clinique Présence de personnels formés et compétents pour la maintenance présents à la faculté Investissement initial moins important
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> Ne permet pas la réalisation de toutes les phases opératoires d'un traitement Ergonomie moins proche de la réalité clinique L'auto-évaluation ne doit pas être au détriment de la réflexion clinique Demande un personnel compétent et formé, notamment en cas de panne Investissement initial conséquent Rapport coût/bénéfice difficile à évaluer 	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté de l'objectivité de l'évaluation : dépendante de l'enseignant et de la difficulté anatomique de la dent naturelle Difficulté d'obtention des dents naturelles Soucis éthique et sanitaire pour les dents naturelles Moins de réalisme pour les dents en résine Plus cher pour les étudiants : achat du consommable, voire des rotatifs Requière la présence de plus de personnel

Tableau 2 : Comparaison des avantages et inconvénients entre le simulateur virtuel VirTeaSy Dental© et un simulateur physique ou fantôme

5. Apport de la simulation dans l'enseignement préclinique en odontologie

Les simulateurs sont de plus en plus utilisés dans les facultés d'Odontologie et certaines recherches publiées ont étudié l'apport de la simulation dans l'enseignement en odontologie.

Plusieurs études réalisées sur le simulateur assisté par ordinateur DentSim™ ont suggéré des résultats plutôt positifs. Wierinch et son équipe ont étudié en 2007 la capacité de ce simulateur à discriminer différents niveaux d'expertise en entraînant des experts en odontologie conservatrice, des experts en parodontologie et des étudiants novices à une exercice de préparation de cavité. Ils montrent que les experts ont une performance significativement élevée par rapport aux novices. D'après leurs résultats, les chercheurs concluent que le simulateur DentSim™ semble être un outil valide et sûr pour discriminer la performance des experts.³² L'université d'odontologie de Pennsylvanie a été une des premières universités à intégrer dans son curriculum le simulateur DentSim™ dès 1998. Deux études ont été réalisées dans cette faculté en comparant un groupe d'étudiants « contrôle », utilisant les techniques traditionnelles de pratique préclinique, et un groupe d'étudiants « expérimental », utilisant exclusivement le DentSim™ en pratique préclinique. Les résultats ont montré que les étudiants du groupe expérimental apprenaient plus rapidement, arrivaient au même niveau de performance, accomplissaient plus d'actes pratiques par heure, et demandaient plus d'évaluations par acte ou par heure, comparé aux étudiants du groupe contrôle. Une troisième étude réalisée dans cette même faculté sur des étudiants ayant utilisé lors de leur pratique préclinique à la fois les techniques traditionnelles et le DentSim™ a suggéré que les étudiants voyaient cette technologie comme ayant un rôle positif dans leur entraînement préclinique, qu'ils avaient l'impression d'apprendre plus vite avec le simulateur et qu'ils se sentaient plus sûrs d'eux-mêmes dans l'usage de la turbine après leur entraînement sur le DentSim™. Suite à ses résultats positifs, l'Université de Pennsylvanie a acheté des simulateurs supplémentaires pour les incorporer totalement à la formation préclinique qui a été modifiée dans le but de maximiser le potentiel qu'offre cette technologie.³³

Une autre étude réalisée en 2003 par Quinn et son équipe sur le DentSim™ présente des résultats moins positifs. Deux groupes d'étudiants débutant en odontologie se sont entraînés par méthode conventionnelle ou sur le simulateur DentSim™ uniquement. A la fin de leur période d'entraînement commune, leur préparations finales ont été notées à l'aveugle par deux examinateurs sur des critères de réussite traditionnels tels que la forme de la cavité, sa rétention, la régularité, la profondeur et les angles marginaux. Le groupe entraîné sur le DentSim™ a obtenu des résultats significativement moins élevés pour certains critères (forme du contour, profondeur et régularité) et des résultats équivalents pour d'autres (rétention et angles marginaux). Ces résultats suggèrent que la simulation assistée par ordinateur ne serait pas adéquate comme unique méthode d'entraînement pour les étudiants novices. Les auteurs suggèrent que la simulation pourrait agir en tant que complément aux méthodes traditionnelles, en augmentant l'accès aux étudiants à la pratique et à l'auto-évaluation. Les étudiants de l'étude ont jugé

que le DentSim™ permet d'être plus autonome et de travailler à son rythme, mais que les méthodes traditionnelles apportent une confiance en soi supérieure. Ils en ont conclu qu'une combinaison des deux méthodes, traditionnelle et par la simulation, serait une approche optimale pour l'acquisition des compétences pratiques et manuelles.³⁴

L'aptitude du simulateur haptique IDEA Dental® à différencier des non-professionnels des étudiants ou des dentistes a été constatée en 2013 par Ben-Gal et son équipe. Les chercheurs ont demandé à des étudiants en odontologie, des dentistes et des non-dentistes, de réaliser plusieurs exercices virtuels de fraisage de formes géométriques sur le simulateur. Le temps de réalisation, la précision, le nombre d'essais pour la réussite de l'exercice et un score fourni par le simulateur ont été enregistrés. Une différence significative entre le groupe non-dentistes et étudiants, et le groupe non-dentistes et dentistes a été démontré pour ces paramètres, mais pas entre les groupes étudiants et dentistes. L'étude suggère que pour augmenter la précision discriminatrice il faudrait rajouter des exercices plus courts en temps et de niveaux plus élevés.³⁵

La capacité de discrimination de différents niveaux de performance a également été étudiée pour le simulateur Simodont®. Sur un exercice d'endodontie réalisé par des étudiants de 2^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} années, une augmentation de la performance a été observée avec le niveau d'étude des étudiants ; et une différence significative a été établie entre les 2^{ème} années et les autres étudiants plus expérimentés. D'une manière générale, ces données suggèrent que le Simodont® est capable de saisir les différences de performances entre des étudiants en odontologie novices et des plus expérimentés, mais pas entre étudiants expérimentés de différents niveaux.³⁶

Une étude récente sur Simodont® a montré que ce simulateur pouvait augmenter la performance des élèves en comparant cette dernière entre deux groupes de 2^{ème} années, l'un s'entraînant sur Simodont® et l'autre sur fantôme. Le groupe entraîné sur Simodont® a obtenu de meilleurs résultats pour une préparation de classe I, évaluée de façon digitale par caméra optique ou de manière traditionnelle par les professeurs.³⁷

Une étude réalisée auprès d'enseignants de l'Université d'Odontologie de Griffith en Australie soumet des résultats plus modérés. Suite à l'utilisation du Simodont®, les enseignants notent les bénéfices pédagogiques des leçons téléchargées proposées mais restent sceptiques tant qu'aux limites techniques perçues du logiciel pour le moment. La plupart pense que le Simodont® ne pourrait pas remplacer totalement les méthodes classiques d'entraînement préclinique, ni les enseignants, mais pourrait être utilisé comme un outil supplémentaire intéressant pour l'auto-évaluation des étudiants.²⁶

Une étude réalisée en 2014 à la faculté d'Odontologie de l'Université d'Harvard a comparé la performance d'étudiants novices en odontologie à celle de diplômés (experts) sur la réalisation d'un exercice d'odontologie restauratrice sur le simulateur virtuel haptique VirTeaSy©. Le but de cette étude pilote était de valider la précision de ce simulateur en déterminant si ce dernier peut détecter une

différence significative de performance entre un groupe d'étudiants novices et des experts. Pour ce faire, les deux groupes ont reçu un même entraînement de calibration sur le simulateur, puis ont réalisé trois fois le même exercice de fraisage d'une carie virtuelle. Des différences significatives de moyennes entre les deux groupes ont été obtenues pour le pourcentage de carie éliminée et le volume de dent saine éliminé. Les sujets experts ont retiré une plus grande portion de lésion carieuse, mais également un plus grand volume de dent saine. L'efficacité, définie par les auteurs comme le pourcentage de carie éliminée facteur du temps de fraisage, a augmenté significativement entre les expériences pour les deux groupes. Les auteurs concluent que ce simulateur est assez sensible pour discerner des utilisateurs de différents niveaux de compétence. Ils appuient la validité de ce simulateur.³⁸

5) Objectifs de l'étude

L'acquisition d'une dextérité manuelle et sensitive, ainsi que du bon geste clinique, est un point clé de l'enseignement préclinique en odontologie. Les simulateurs haptiques semblent être présentés comme le futur outil pédagogique dans cet enseignement du fait de leur réalisme clinique. En effet si les simulateurs haptiques, grâce au retour de force, miment fidèlement la résistance tissulaire de la dent, l'utilisateur ressent des sensations tactiles dites « similaires » à celles ressenties au cours de l'acte clinique. Si ces nouveaux outils simulent la réalité clinique, il paraîtrait logique que la performance des utilisateurs sur les simulateurs soit fonction du niveau d'expérience de ces utilisateurs. Autrement dit, des utilisateurs ayant déjà acquis une expérience clinique en odontologie devraient obtenir des scores supérieurs aux exercices simulés proposés que des utilisateurs novices dans la pratique de l'odontologie.

L'objectif primaire de cette thèse était d'étudier l'intérêt du simulateur VirTeaSy© (société HRV Simulation) dans l'enseignement préclinique en Dentisterie Restauratrice en évaluant le caractère discriminant de ce simulateur haptique entre des groupes d'utilisateurs de différents niveaux cliniques.

Les objectifs secondaires étaient :

- évaluer la performance des utilisateurs en quantifiant numériquement leur précision du geste ;
- apprécier la progression des participants ;
- interroger les participants sur leur expérience, leur ressenti vis-à-vis de l'utilisation du simulateur et leur avis sur la place du simulateur dans l'enseignement préclinique en odontologie.

II. Matériels et méthodes

1) **Le simulateur VirTeaSy©**

1. Présentation générale

Le simulateur haptique VirTeaSy Dental© (société HRV Simulation) est constitué d'un ordinateur relié à deux écrans. Le premier écran dit « de contrôle » est un écran tactile permettant l'accès à l'interface. Le deuxième écran affiche l'image 3D visible par les lunettes 3D. Quatre dispositifs d'interactions sont également reliés au système : un dispositif haptique, une souris 3D, une pédale et un manipulateur seconde main (Figure 8).



Figure 8 : Le simulateur VirTeaSy© disponible à la faculté d'Odontologie de Bordeaux

2. Présentation des composants

a) Le bras haptique

Le bras haptique se situe sous le second écran et repose sur son socle (Figure 9A). Il constitue le point central du simulateur en interagissant avec l'environnement virtuel et apportant un feedback à l'utilisateur ou retour de force. Le stylet représente la turbine et doit être ainsi manipulé tel qu'une turbine. La turbine virtuelle se matérialise visuellement, geste pour geste, en deux dimensions sur l'écran de contrôle et en trois dimensions sur le second écran et à travers les lunettes 3D. La colocalisation simultanée entre le bras haptique et le second écran augmente considérablement le réalisme de la simulation.

Lors du contact virtuel entre le stylet haptique et la dent virtuelle, le retour de force bloque le bras haptique, donnant ainsi à l'utilisateur la sensation de toucher une dent réelle. Lors de l'utilisation de la pédale et de la mise en rotation de la turbine virtuelle, le retour de force est tel que l'utilisateur a la sensation de traverser les tissus de la dent et de « s'enfoncer ». Les différences de densités entre les divers tissus de la dent sont prises en compte par le logiciel, ce qui participe au réalisme de l'expérience. Diverses trousse d'instruments (fraises, sondes) sont à disposition, renforçant également le réalisme de l'expérience.

b) Les lunettes 3D

Les lunettes 3D permettent à l'utilisateur d'avoir une vision, dans les trois dimensions de l'espace, du travail réalisé en temps réel (Figure 9B).

c) La souris 3D

La souris 3D se présente sous la forme d'un joystick (Figure 9C). Elle permet de déplacer la zone de travail, la tête du patient et également le point de vue du praticien (utilisateur). La rotation du plan de travail et la fonction zoom facilite la réalisation de l'exercice.

d) La pédale

La pédale située aux pieds de l'utilisateur permet la mise en rotation des instruments virtuels lorsque celle-ci est enfoncée (Figure 9D). La relâche de la pédale entraîne un arrêt de l'instrument rotatif virtuel. La pédale fonctionne en mode de tout ou rien, il n'y a pas de contrôle de la vitesse de rotation.

e) Le manipulateur seconde main ou miroir

Le manipulateur seconde main permet de manipuler le miroir de dentiste. Cet outil n'est pas affiché par défaut et est plutôt utile pour les exercices « cas cliniques » pour travailler la vision indirecte.

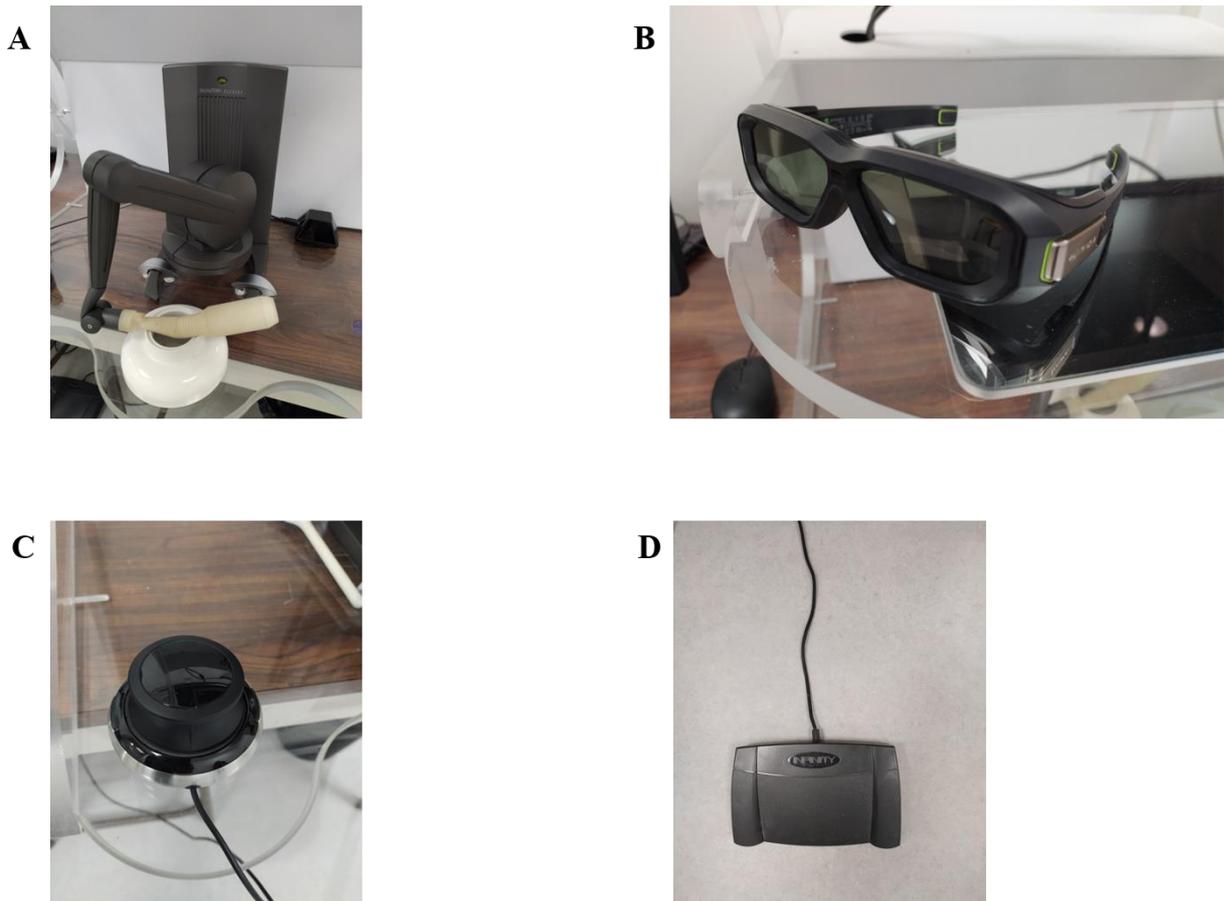


Figure 9 : Les composants du VirTeaSy©

A : Le bras haptique

B : Les lunettes 3D

C : La souris 3D

D : La pédale

3. Présentation de l'interface

L'interface du logiciel est accessible sur l'écran de contrôle. Un module de navigation permet, de manière intuitive, de gérer les comptes utilisateur, de présenter et d'accéder aux exercices, de configurer l'environnement informatique (Figure 10).

Il existe 3 types de profil d'utilisateur : administrateur, enseignant et apprenant. Chaque profil peut accéder seulement aux modules de navigation qui lui sont attribués. Ainsi le profil administrateur a accès à tous les modules, peut configurer les exercices, créer de nouveaux utilisateurs et gérer les profils. Le profil apprenant est dédié aux étudiants et leur permet de réaliser les exercices disponibles et d'accéder aux contenus théoriques disponibles. Les apprenants peuvent être regroupés par promotion. Enfin, le profil enseignant est généralement attribué à un membre de l'équipe pédagogique. L'enseignant peut gérer les apprenants et les promotions et gérer les contenus des exercices.

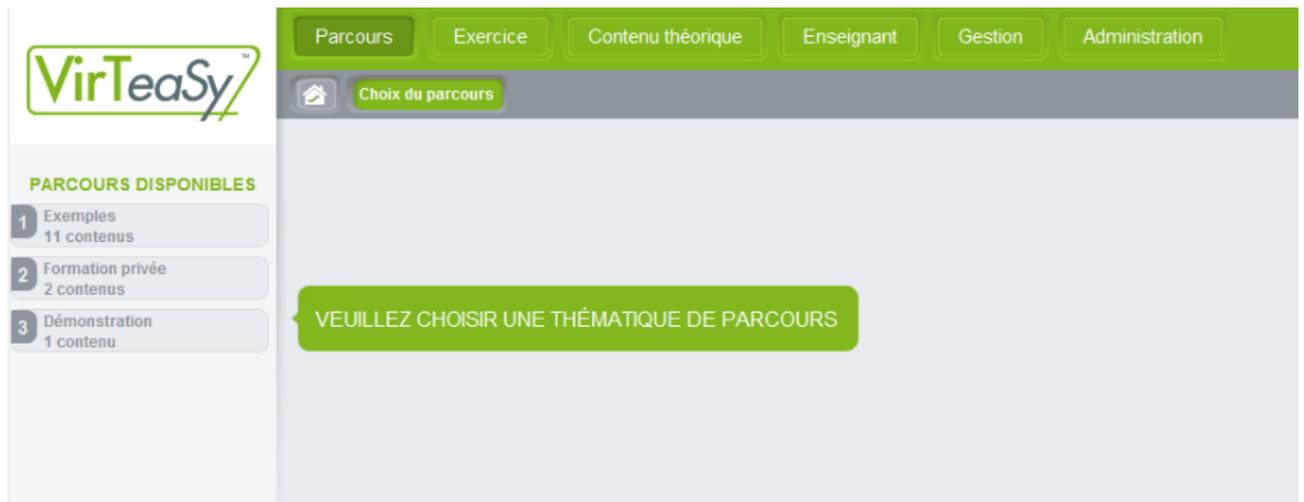


Figure 10 : Accueil de l'interface du logiciel VirTeaSy©

4. Présentation des différents exercices proposés

Le VirTeaSy Dental© propose 5 thématiques d'exercice (Figure 11A) :

- Familiarisation : Les exercices de cette catégorie sont des exercices de base qui permettent aux utilisateurs d'appréhender les principes de la dentisterie et l'utilisation du simulateur ;
- Odontologie : Les exercices de cette catégorie permettent de réaliser des travaux d'odontologie comme les classifications de Black et Sista ;
- Endodontie : Les exercices de cette catégorie permettent de réaliser des travaux d'endodontie sur incisive, canine, prémolaire et molaire ;
- Prothèse : Les exercices de cette catégorie permettent de réaliser des travaux de préparation à la pose de prothèse sur incisive, canine et molaire ;
- Implantologie : Les exercices de cette catégorie permettent de réaliser des travaux de préparation à la pose d'implant.

L'exercice se déroule en 3 étapes (Figure 11B) :

- La présentation de l'exercice : les objectifs pédagogiques, les instructions, les précautions à prendre et les critères d'évaluation sont décrits ;
- La simulation : soit la réalisation de l'exercice à proprement parler dans l'environnement virtuel ;
- L'évaluation : l'apprenant est évalué objectivement sur son travail en phase de simulation. L'objectif pédagogique est validé ou non. La phase d'évaluation est réalisable à tout moment durant l'intervention virtuelle et l'utilisateur peut revenir à l'intervention pour continuer son travail. Il peut également enregistrer et sauvegarder son évaluation afin d'accéder aux résultats de celle-ci plus tard.



Figure 11 : Les exercices
 A : Les différentes thématiques proposées
 B : Les étapes de l'exercice

2) Groupes de participants à l'étude

Les participants à l'étude ont été sélectionnés sur la base du volontariat. Les 56 participants ont été répartis en 5 groupes :

- Groupe 1 (n=12) : participants n'ayant aucun lien avec la pratique de l'odontologie (étudiants en médecine et pharmacie, ingénieurs, avocat, ostéopathe et graphiste), dits non-odontologistes.
- Groupe 2 (n=10) : étudiants en 2^{ème} année d'odontologie de l'Université de Bordeaux, ayant pratiqué sur dents en ivoirine en travaux pratiques pendant un semestre.

- Groupe 3 (n=12) : étudiants en 4^{ème} année d'odontologie de l'Université de Bordeaux, ayant pratiqué sur dents en ivoirine et dents naturelles extraites lors de leurs 2^{ème} et 3^{ème} années et ayant réalisé un semestre de stage hospitalier clinique.
- Groupe 4 (n=11) : étudiants en 6^{ème} année de l'Université de Bordeaux, ayant réalisé 5 semestres de stage hospitalier clinique.
- Groupe 5 (n=11) : chirurgiens-dentistes et jeunes diplômés de l'Université de Bordeaux ayant une expérience en activité libérale.

L'âge des participants constituait un critère d'inclusion : les participants devaient avoir entre 18 et 35 ans. Les étudiants de plus de 35 ans et les redoublants ont été exclus de cette étude.

Par ailleurs, les participants ne devaient jamais avoir utilisé le simulateur VirTeaSy Dental©.

3) Déroulement de l'exercice

Pour chaque participant, un profil nominatif a été créé et intégré à une promotion correspondant à son groupe. Ainsi les participants du groupe 1 avaient chacun leur profil personnel appartenant à la promotion 1, et ainsi pour tous les groupes.

L'utilisateur s'installait sur un tabouret de façon ergonomique face au second écran, portait les lunettes 3D, tenait le stylet haptique avec sa main droite (si droitier), manipulait la souris 3D avec la main gauche, et posait son pied proche de la pédale (Figure 12).



Figure 12 : Installation ergonomique des étudiants
A gauche : exemple d'un étudiant gaucher. A droite : exemple d'une étudiante droitère.

L'exercice proposé était l'exercice n°1 d'Odontologie Conservatrice. Son objectif pédagogique annoncé était « Réaliser une préparation cavitaire pour amalgame sur molaire n°46. Le type de cavité est de type 1. ». (Figure 13)



Figure 13 : Sélection de l'exercice n°1 de la thématique Odontologie Conservatrice

La trousse Henry Schein conseillée est sélectionnée (Figure 14), et pour plus de facilité, deux fraises étaient mises à disposition des sujets : la fraise boule tungstène 23016 et la fraise pear bur long 830L010. Le sujet était libre de changer de fraise entre et pendant les exercices.



Figure 14 : La trousse Henry Schein mise à disposition pour l'exercice

Les participants n'ayant auparavant jamais utilisé le simulateur VirTeaSy Dental© (ou autre simulateur de réalité virtuelle), des explications et une démonstration leur avaient été fournies avant leur propre performance. Une fois l'exercice lancé et quand le participant s'estimait prêt à démarrer, un chronomètre de 3 minutes était lancé (Figure 15).

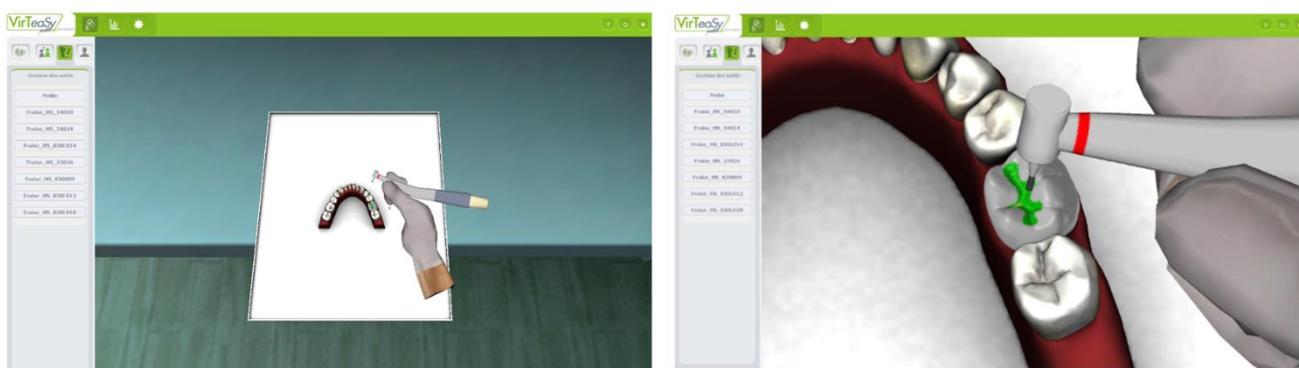


Figure 15 : Lancement de l'exercice

Ce que le sujet voit en 3D à travers les lunettes est retranscrit en 2D sur l'écran de contrôle en temps réel. Le sujet sélectionne une fraise virtuelle et prend en main le stylet pour se positionner sur l'arcade. A gauche : première vue du plan de travail. A droite : vue du plan de travail après zoom.

Le sujet essayait alors d'éliminer un maximum de tissu cible représenté pour la couleur verte, en éliminant *a contrario* le moins possible de tissu sain représenté par la couleur blanche. Le tissu de couleur jaune en profondeur du tissu cible représentait une zone de sécurité qui pouvait être éliminée sans incidence sur le résultat, l'objectif étant d'éliminer tout le tissu cible sans toucher au tissu sain. Au bout des 3 minutes ou avant si le sujet le désirait, l'exercice était arrêté et la performance était évaluée par le logiciel (Figure 16).

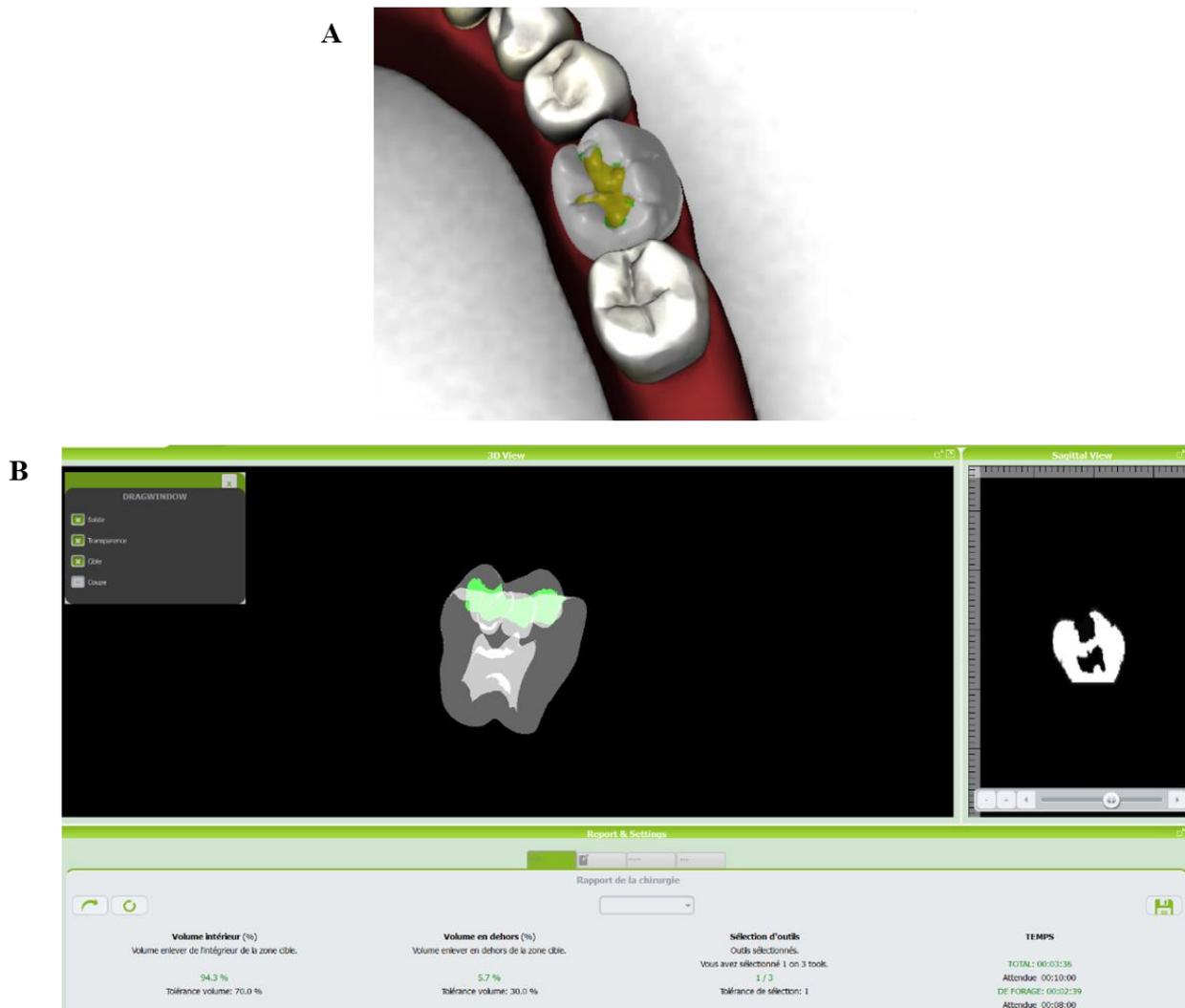


Figure 16 : Evaluation à la fin de l'exercice

Exemple du travail réalisé par un étudiant de 2^{ème} année.

A : vue occlusale de la dent. On peut observer que quasiment la totalité de la cible a été éliminée.

B : Evaluation du logiciel : vue 3D, coupe sagittale et évaluation quantitative des volumes.

Afin de supprimer le biais que pouvait constituer la découverte du simulateur et d'obtenir des résultats plus représentatifs, les participants ont effectué l'exercice trois fois de suite. Ainsi, leurs performances mais aussi leurs progressions ont été évaluées.

4) Analyse des résultats : valeurs étudiées

A la fin de chaque exercice, le logiciel calculait les valeurs suivantes (Figure 16B) :

- le volume intérieur (VI) qui correspond au pourcentage de volume à l'intérieur de la cible (soit le tissu cible de couleur verte) qui a été éliminé par le sujet,

- le volume extérieur (VE) qui correspond au pourcentage de volume extérieur à la cible (soit le tissu sain de couleur blanche) qui a été éliminé à tort par le sujet.

La différence (DV) entre ces 2 derniers volumes VI et VE, plus représentative de la performance du sujet, n'est pas donnée par le logiciel mais a été calculée. Le taux de progression (tP) de chaque étudiant a été également calculé entre les 3 essais à partir de la formule :

$$tP = (\max DV - \min DV) / \min DV$$

Les moyennes (mVI, mVE, mDV) entre tous les sujets d'un même groupe ont été calculées pour ces trois valeurs (VI, VE et DV), ainsi que les écarts-types.

5) Questionnaire

A la fin de l'expérience, les participants des groupes 2 à 5 ont été invités à répondre à un questionnaire à échelle d'intention (Figure 17). La note 5 correspondait à la plus haute note d'accord et la note 1 à la plus basse. Les fréquences de scores ont été calculées pour chaque groupe. Les sujets ont également été libres de s'exprimer sur les points mentionnés par le questionnaire et sur leur ressenti et avis général sur l'exercice de simulation.

J'ai trouvé que les sensations tactiles lors de l'utilisation du simulateur étaient semblables à la réalité clinique	1	2	3	4	5
J'ai trouvé que l'arcade dentaire et les instruments du simulateur étaient réalistes	1	2	3	4	5
J'ai trouvé l'utilisation du simulateur facile	1	2	3	4	5
Je pense que je me sentirais plus sûr.e. de moi et de ma dextérité en clinique si je m'entraînais sur le simulateur de façon régulière	1	2	3	4	5
Je pense que le simulateur pourrait permettre d'acquérir une dextérité manuelle aussi rapidement que les autres méthodes traditionnelles d'apprentissage préclinique (dents en ivoirine, dents naturelles extraites)	1	2	3	4	5
Je pense que le simulateur pourrait permettre d'acquérir une dextérité manuelle de manière aussi qualitative que les autres méthodes traditionnelles d'apprentissage préclinique (dents en ivoirine, dents naturelles extraites)	1	2	3	4	5
Je pense que l'utilisation du simulateur est un atout à l'apprentissage préclinique	1	2	3	4	5
Je pense que l'utilisation du simulateur pourrait remplacer les méthodes traditionnelles d'apprentissage préclinique (travaux sur fantômes et sur dents extraites)	1	2	3	4	5
Je suis satisfait.e. de cette expérience	1	2	3	4	5

Figure 17 : Questionnaire remis aux étudiants à la fin de leur expérience

6) Analyse statistique

Le test statistique non paramétrique de Kruskal Wallis sur ici 5 échantillons indépendants a été utilisé pour comparer les différentes moyennes et les taux de progressions de chaque groupe. Les fréquences de score du questionnaire ont également été étudiées. Toutes ces analyses ont été réalisées sur le logiciel statistique Epi Info Classic. Les différences étaient considérées significatives pour une *p value* $p < 0,05$.

III. Résultats

1) Comparaison des différentes valeurs étudiées entre les groupes pour le premier essai

En comparant les moyennes du volume intérieur lors du premier essai (VI1), soit le volume cible éliminé par les participants, nous avons observé une augmentation de ce volume entre les étudiants en 2^{ème} année et les jeunes diplômés ($m_{VI1} = 75,91$ pour le groupe 2 et $m_{VI1} = 85,41$ pour le groupe 5). Les participants du groupe 1 ou participants non-odontologistes ont obtenu une moyenne ($m_{VI1} = 84,57$) supérieure à celle des étudiants en 2^{ème} ($m_{VI1} = 75,91$), 4^{ème} ($m_{VI1} = 84,03$) et 6^{ème} années ($m_{VI1} = 79,96$). Aucune différence significative n'a été observée pour ces valeurs. (Figure 18)

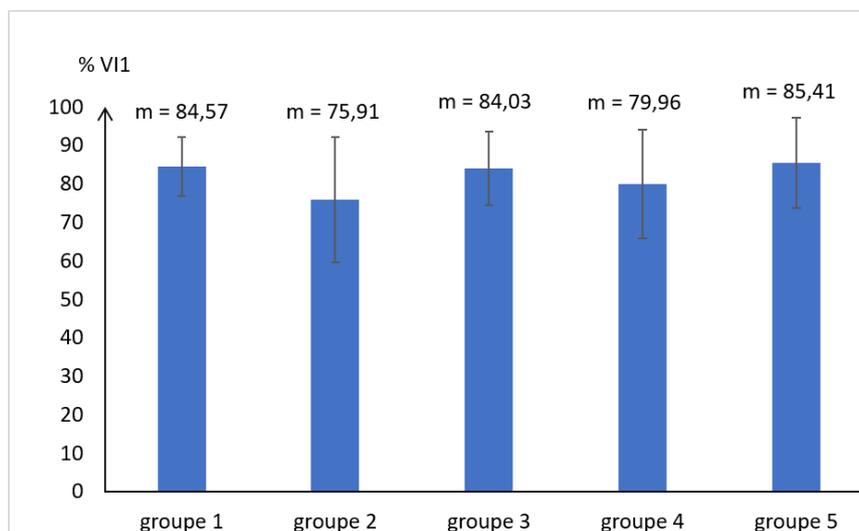


Figure 18 : Comparaison du pourcentage moyen de volume intérieur – Essai 1

En comparant les moyennes du volume extérieur lors du premier essai (VE1), soit le volume extérieur à la cible éliminé à défaut par les participants, nous avons observé une augmentation de ce volume avec le niveau des étudiants ($m_{VE1} = 5,49$ pour les 2^{ème} année, $m_{VE1} = 5,67$ pour les 4^{ème} année, $m_{VE1} = 6,15$ pour les 6^{ème} année et $m_{VE1} = 6,55$ pour les jeunes diplômés) sans différence significative. Cette moyenne est la plus élevée pour les participants non-odontologistes du groupe 1 ($m_{VE1} = 7,11$). Ainsi,

les étudiants en 2^{ème} année ont été les plus conservateurs lors de ce premier essai ; et les jeunes diplômés et les non-odontologistes ont été les moins conservateurs. Aucune différence significative n'a été observée pour ces valeurs. (Figure 19)

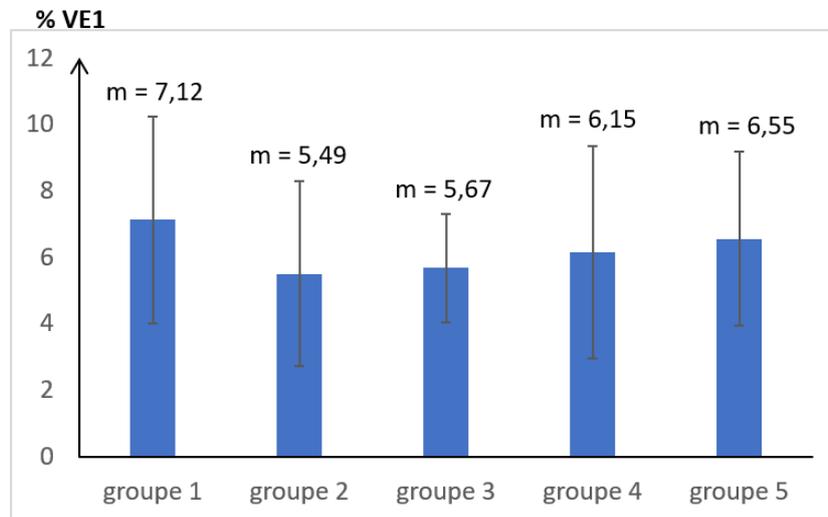


Figure 19 : Comparaison du pourcentage moyen de volume extérieur – Essai 1

Lorsque l'on s'intéresse à la différence entre ces 2 volumes (DV1) nous avons observé la même tendance que pour les moyennes de VI1 avec une augmentation entre les 2^{ème} année (mDV1 = 70,42), les 6^{ème} année (mDV1 = 73,81), les non-odontologistes (mDV1 = 77,46), les 4^{ème} année (mDV1 = 78,36) et les jeunes diplômés (mDV1 = 78,85) sans différence significative. (Figure 20)

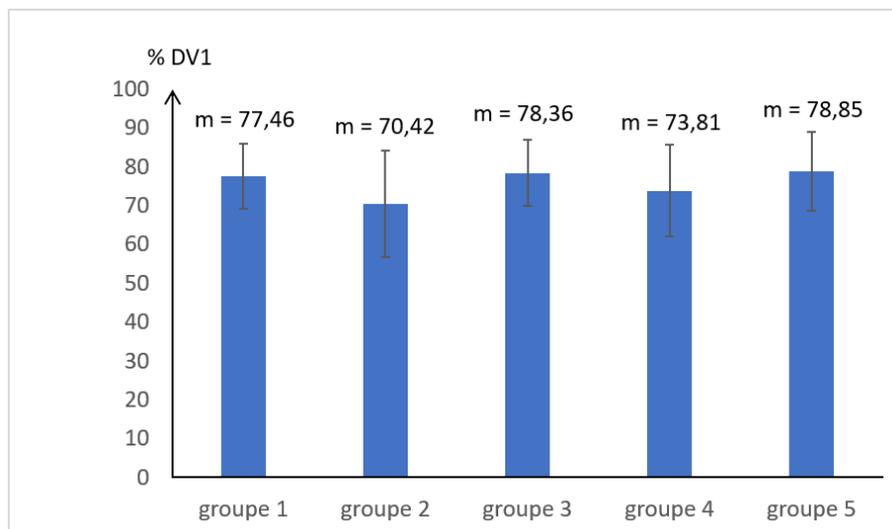


Figure 20 : Comparaison du pourcentage moyen de la différence entre les volumes intérieur et extérieur – Essai 1

2) Comparaison des différentes valeurs étudiées entre les groupes pour le deuxième essai

Lors du deuxième essai, pour les moyennes du volume intérieur, nous avons observé une augmentation entre les étudiants de 2^{ème} année (mVI2 = 80,69) et les 6^{ème} (mVI2 = 88,09) et jeunes diplômés (mVI2 = 87,10). Les non-odontologistes ont également obtenu un VI élevé (mVI2 = 87,63). Aucune différence significative n'a été observée pour ces valeurs. (Figure 21)

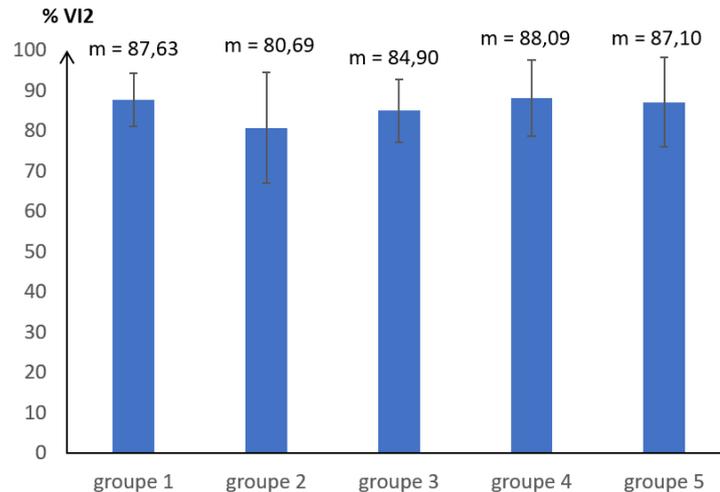


Figure 21 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume intérieur – Essai 2

Pour ce second essai, ce sont les étudiants de 4^{ème} année qui ont été les plus conservateurs (mVE2 = 4,85) et les non-odontologistes les moins conservateurs (mVE2 = 6,21). (Figure 22)

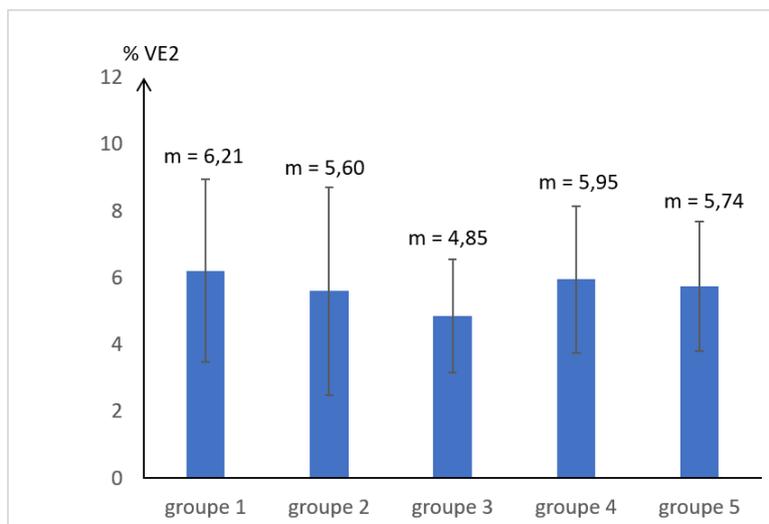


Figure 22 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume extérieur – Essai 2

La moyenne de différence de volume la plus basse a été obtenue par les 2^{ème} année (mDV2 = 75,09). Elle est sensiblement la même pour les autres niveaux (mDV2 = 80,05 pour les 4^{ème} année, mDV2 = 82,13 pour les 6^{ème} année, mDV2 = 81,35 pour les jeunes diplômés et mDV2 = 81,41 pour les non-odontologues). Aucune différence significative n'a été observée pour ces valeurs. (Figure 23)

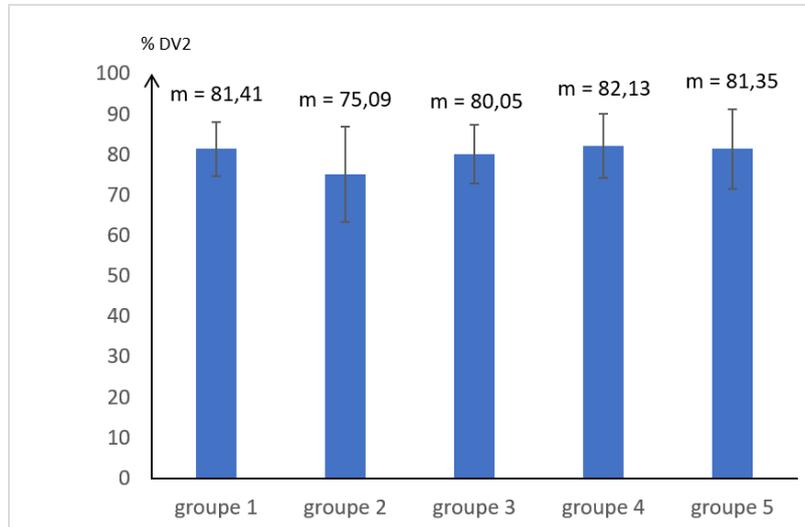


Figure 23 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de différence entre les volumes intérieur et extérieur – Essai 2

3) Comparaison des différentes valeurs étudiées entre les groupes pour le troisième essai

Lors du troisième essai, des différences significatives de volume intérieur ont été observées entre les étudiants de 2^{ème} année (mVI3 = 84,42) et de 4^{ème} année (mVI3 = 90,66), avec les jeunes diplômés (mVI3 = 93,76) et avec les non-odontologues (mVI3 = 94,01). (Figure 24)

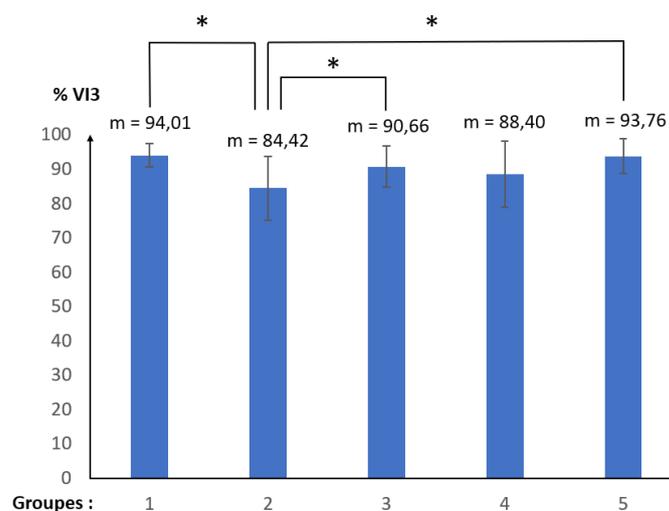


Figure 24 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume intérieur – Essai 3

Les astérisques (*) indiquent une différence significative pour une *p* value $p < 0,05$.

Comme lors du premier essai, la moyenne du volume extérieur augmente avec le niveau d'étude des étudiants (de mVI3 = 5,27 pour les 2^{ème} année à mVI3 = 6,86 pour les jeunes diplômés) et est la plus élevée pour les non-odontologistes (mVI3 = 7,25) sans significativité. (Figure 25)

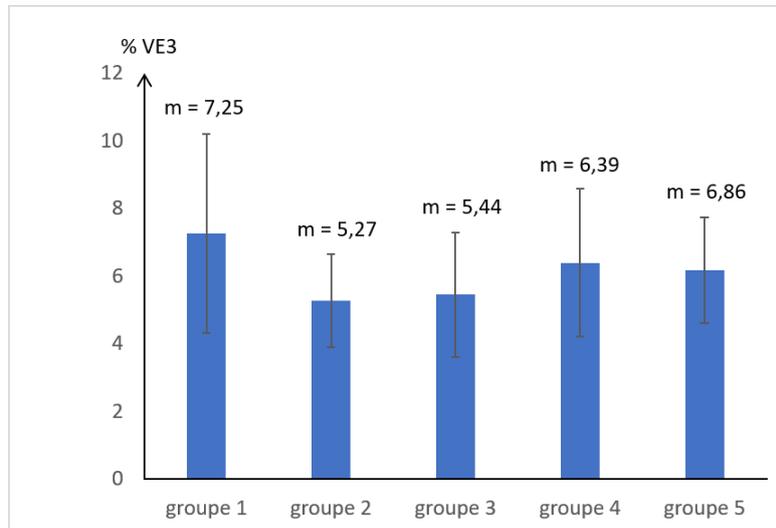


Figure 25 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de volume extérieur – Essai 3

Au niveau de la différence de volumes, nous avons retrouvé les mêmes différences significatives que pour le volume intérieur, à savoir entre les étudiants de 2^{ème} année (mDV3 = 79,15) et de 4^{ème} année (mDV3 = 85,22), avec les jeunes diplômés (mDV3 = 87,6) et avec les non-odontologistes (mDV3 = 86,75). A l'issue des trois essais, ce sont donc les jeunes diplômés qui ont été les plus performants. (Figure 26)

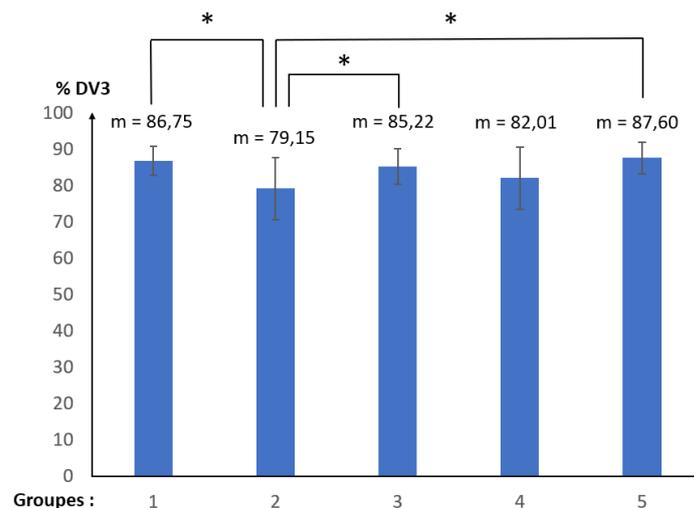


Figure 26 : Comparaison entre les groupes des moyennes de pourcentage de différence entre les volumes intérieur et extérieur – Essai 3

Les astérisques (*) indiquent une différence significative pour une *p value* $p < 0,05$.

4) Comparaison du taux de progression entre les groupes

Les jeunes diplômés ont obtenu le taux de progression le faible ($tP = 16,93$). Il est un peu plus élevé pour les 4^{ème} année ($tP = 17,48$), les non-odontologistes ($tP = 18,71$) et les 6^{ème} année ($tP = 19,34$). C'est pour les 2^{ème} année que le taux de progression a été le plus important ($tP = 26,6$) mais sans significativité. (Figure 27)

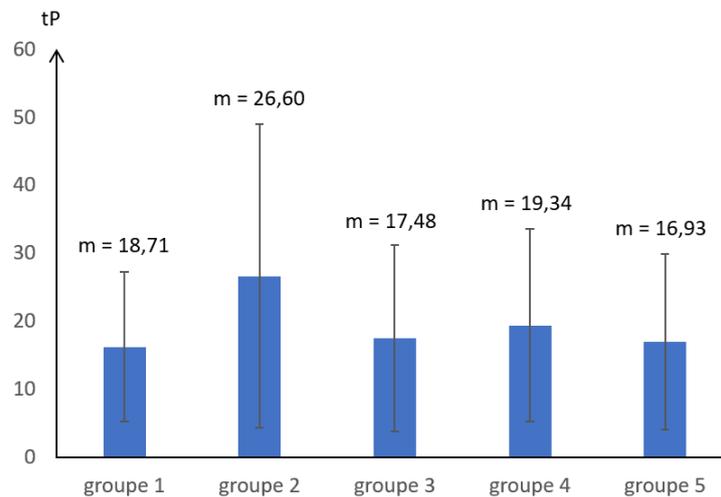


Figure 27 : Comparaison du taux de progression entre les groupes

5) Comparaison des résultats du questionnaire entre les groupes

Les résultats au questionnaire ont été analysés sous forme de moyennes et de fréquences. Globalement, les moyennes obtenues par question sont proches entre les différents groupes d'étudiants et nous observons également une répartition commune de réponse.

A la question 1 « J'ai trouvé que les sensations tactiles lors de l'utilisation du simulateur étaient semblables à la réalité clinique », les étudiants ont attribué en majorité la note de 2 ($f = 15/44$) et 3 ($f = 19/44$), la moyenne étant de 2,60. Seuls les jeunes diplômés ont répondu de façon plus homogène, avec une fréquence $f = 2/11$ pour la note de 1 et une fréquence $f = 3/11$ pour les notes 2, 3 et 4. (Figure 28)

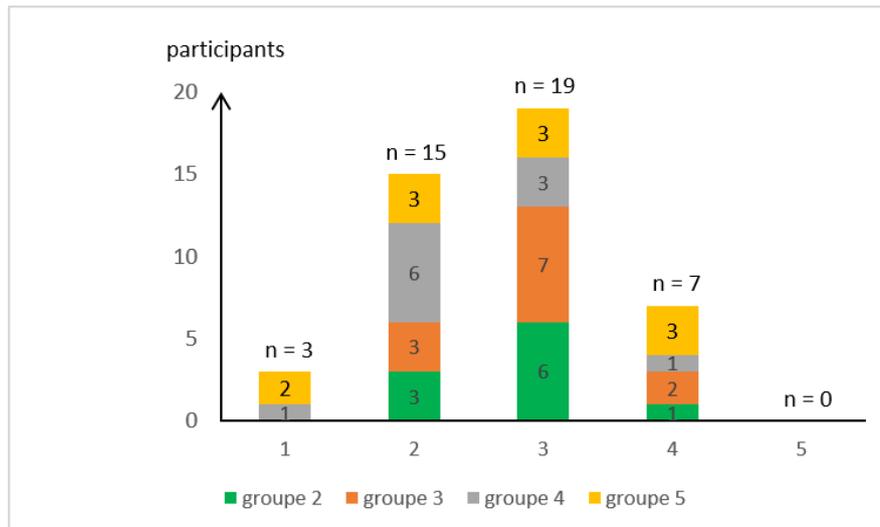


Figure 28 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 1

A la question 2 « J'ai trouvé que l'arcade dentaire et les instruments du simulateur étaient réalistes », la moyenne obtenue par tous les participants est de 3,98. Les notes de 4 ($f = 21/44$) et de 5 ($f = 11/44$) ont été les plus attribuées. Les étudiants de 2^{ème} année ont été un peu plus réservés en attribuant de façon plus homogène les notes de 3, 4 et 5 ($f = 3/10$ pour chacune des notes). (Figure 29)

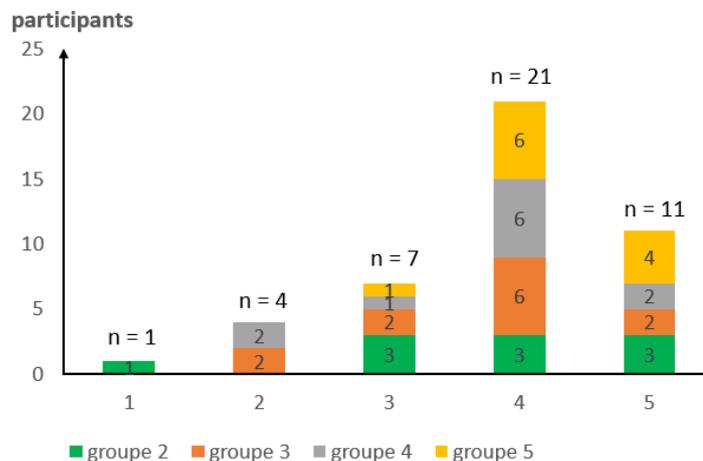


Figure 29 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 2

A la question 3 « J'ai trouvé l'utilisation du simulateur facile », la répartition des notes est plus équilibrée avec une fréquence $f = 2/44$ pour la note 1, $f = 10/44$ pour les notes 2 et 4, $f = 16/44$ pour la note 3 et $f = 6/44$ pour la note 5. La moyenne obtenue est de 3,24. (Figure 30)

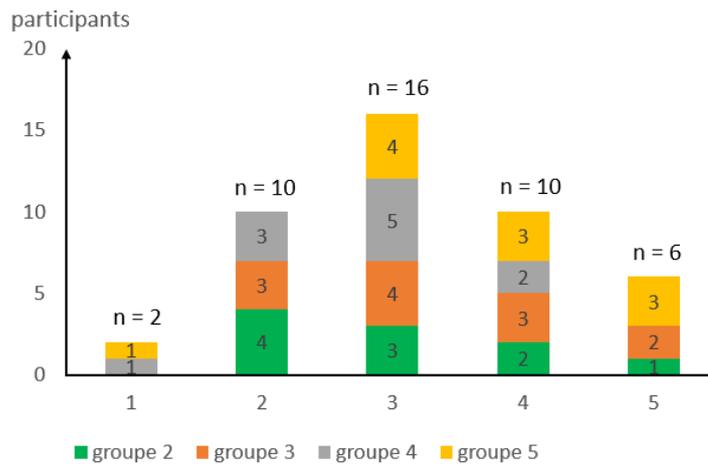


Figure 30 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 3

A la question 4 « Je pense que je me sentirais plus sûr.e. de moi et de ma dextérité en clinique si je m’entraînais sur le simulateur de façon régulière », les notes les plus distribuées sont 2 (f = 15/44), 3 (f = 9/44) et 4 (f = 10/44). La moyenne est 2,66. (Figure 31)

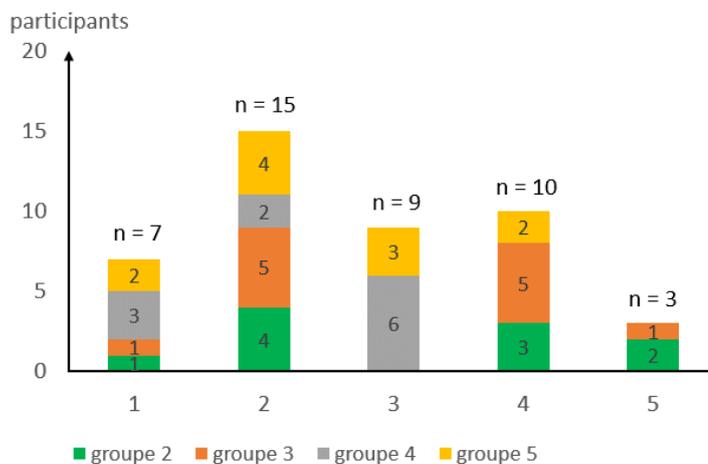


Figure 31: Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 4

A la question 5 « Je pense que le simulateur pourrait permettre d’acquérir une dextérité manuelle aussi rapidement que les autres méthodes traditionnelles d’apprentissage préclinique (dents en ivoirine, dents naturelles extraites) », les étudiants ont massivement répondu par la note 1 (f = 14/44), 2 (f = 17/44) et 3 (f = 11/44). Seulement deux étudiants ont attribué la note de 4 et aucun la note de 5. La moyenne à cette question est 2,09. (Figure 32)

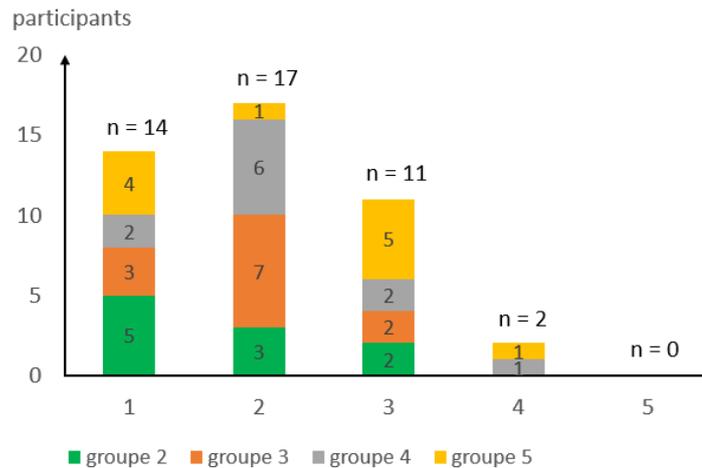


Figure 32 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 5

A la question 6 « Je pense que le simulateur pourrait permettre d’acquérir une dextérité manuelle de manière aussi qualitative que les autres méthodes traditionnelles d’apprentissage préclinique (dents en ivoirine, dents naturelles extraites) » les étudiants ont majoritairement répondu par la note 2 ($f = 21/44$). Environ un quart ont attribué la note 1 ($f = 9/44$) et un autre quart la note 3 ($f = 12/44$). Seulement deux étudiants ont attribué la note de 4 et aucun la note de 5. La moyenne à cette question est 2,11. (Figure 33)

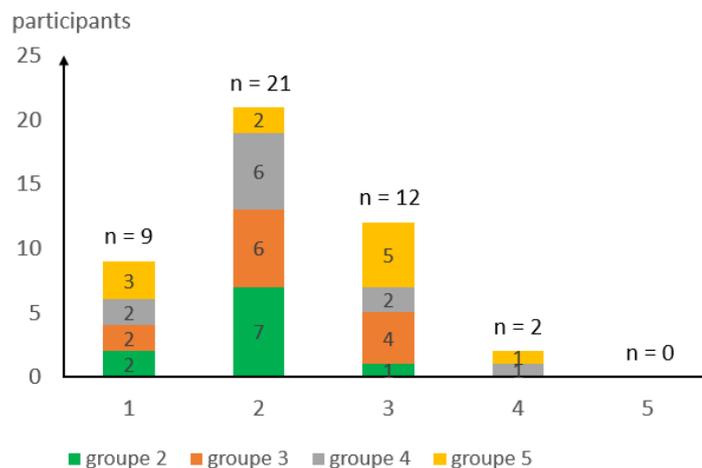


Figure 33 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 6

A la question 7 « Je pense que l’utilisation du simulateur est un atout à l’apprentissage préclinique », la moyenne est 3,49. Les notes de 4 ($f = 17/44$) et de 3 ($f = 11/44$) ont été les plus données. (Figure 34)

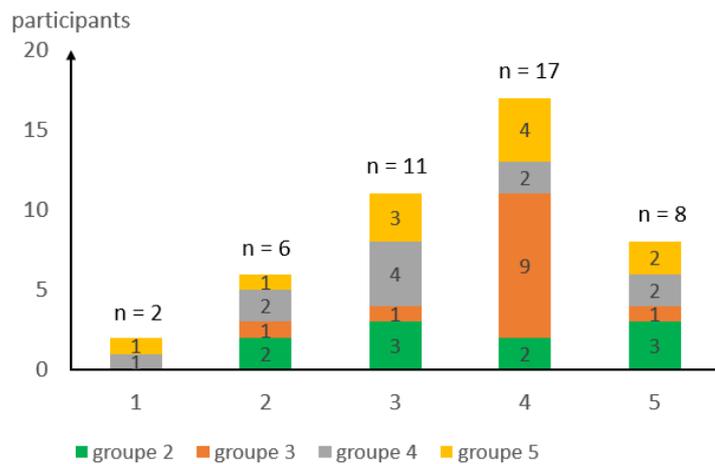


Figure 34 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 7

A la question 8 « Je pense que l'utilisation du simulateur pourrait remplacer les méthodes traditionnelles d'apprentissage préclinique (travaux sur fantômes et sur dents extraites) », plus de la moitié des étudiants ont répondu par la note 1 (f = 23/44). Quinze étudiants ont répondu par la note 2, cinq par la note 3, aucun par la note 4 et un seul étudiant (du groupe des 6^{ème} année) par la note 5. La moyenne pour cette question est 1,64. (Figure 35)

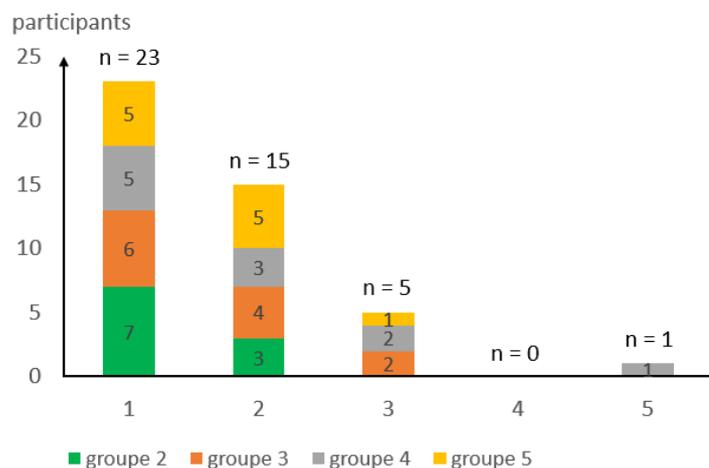


Figure 35 : Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 8

A la question 9 « Je suis satisfait.e. de cette expérience », les étudiants ont répondu positivement avec une moyenne de 4,06. Les étudiants de 4^{ème} année ont été les plus satisfaits en répondant massivement par la note de 5 (f = 8/12). Les jeunes diplômés ont également le plus souvent attribué la note de 5 (f = 5/11). Les étudiants de 2^{ème} année ont majoritairement donné la note de 4 (f = 6/10). Les étudiants de 6^{ème} année ont été les moins convaincus en attribuant en majorité la note de 3 (f = 6/11). (Figure 36)

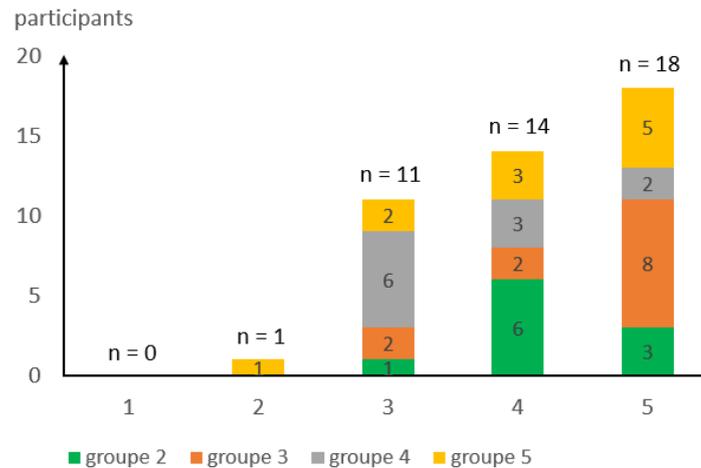


Figure 36: Fréquences de réponse aux différentes notes selon les groupes à la question 9

IV. Discussion

1) Autour des résultats obtenus

Globalement, nous observons une augmentation des valeurs de pourcentage de VI et DV avec le niveau d'expérience clinique en odontologie entre les 2^{ème}, 4^{ème}, 6^{ème} années et les jeunes diplômés. On observe également une tendance des années inférieures à être plus conservateurs que les années supérieures. Lors de l'étude réalisée en 2014 sur le simulateur VirTeaSy© les étudiants novices avaient également été plus conservateurs. Ceci peut s'expliquer par le fait que les sujets experts ont une tendance à plus fraiser que les novices, éliminant plus de tissu sain en même temps que le tissu carieux.³⁸

Lors du troisième essai, pour les valeurs VI3 et DV3 une différence significative est obtenue entre les 2^{ème} et 4^{ème} années et entre les 2^{ème} et jeunes diplômés. Ceci suggère que le simulateur haptique serait discriminant à partir du 3^{ème} essai. On peut tout de même évoquer une faiblesse de discrimination entre tous les niveaux, et également se demander si cette significativité serait renforcée en augmentant le nombre d'essais. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Eve et al. qui avait également montré le caractère discriminant de ce simulateur haptique entre des novices et des experts.³⁸

Le groupe des non-odontologistes a obtenu des valeurs VI et DV toujours supérieures au groupe des 2^{ème} années et parfois aussi supérieures aux autres niveaux. Lors du troisième essai, cette différence est même significative avec le groupe 2. Ces résultats sont surprenants mais peuvent être expliqués par l'hypothèse qu'il est peut-être plus facile de prendre en main initialement le logiciel sans y chercher un regard clinique et sans le comparer avec d'autres techniques d'entraînement ou avec la réalité clinique. De plus le logiciel ne prenant pas en compte la forme finale de la cavité réalisée mais que son volume, certaines erreurs jugées cliniquement comme un échec (comme la mutilation des crêtes marginales pour

ici la réalisation d'une cavité occlusale, ou la mutilation trop importante de cuspides) ne sont pas pénalisées. Ceci peut être un avantage pour les non-odontologistes car, sans connaissance clinique, ils peuvent rendre un travail cliniquement moins acceptable mais tout en ayant un score acceptable.

Cette limite des systèmes est peu explorée dans la littérature pour les différents simulateurs. Le pourcentage de volume de matériel éliminé à l'intérieur ou à l'extérieur d'une cible ne semble pas être une donnée suffisante pour un apprenti ou une personne ne pratiquant pas l'odontologie. En effet, les simulateurs évaluent la concordance entre une forme produite par l'utilisateur et une forme préprogrammée par le logiciel. Pourtant tous les tissus dentaires ne sont pas équivalents et toute déviation de la cible n'aura pas la même incidence. Retirer quelques millimètres carrés de matériel sur le bord de la cible permet encore la restauration d'une dent ; alors que retirer le même volume de matériel en profondeur dans la pulpe pourrait avoir bien plus de conséquence. Une appréciation de ces différences n'est pas toujours prise en compte dans l'évaluation des logiciels, ce qui pourrait tromper l'étudiant dans la réelle perception clinique de sa performance. De plus, la méthode de score n'est qu'une mesure de produit final, elle ne considère pas l'approche clinique et les décisions opératoires sous-jacentes de l'étudiant. Par exemple, elle ne prend pas en compte s'il y avait un mauvais contrôle de la pièce à main, un manque de points d'appuis, une mauvaise posture, ou encore une erreur fondamentale dans la stratégie opératoire de l'étudiant. Un retour sur ces aspects spécifiques qui donnerait à l'étudiant une critique plus clinique de sa performance, n'est pas souvent rapporté dans la littérature.³⁹

Le taux de progression a été le plus important pour les 2^{ième} années, mais les écarts-types sont tellement importants qu'il est difficile d'analyser ces valeurs.

Grâce au questionnaire, on peut déduire que les étudiants ont été moyennement convaincus par les sensations tactiles produites par le simulateur, et par la facilité d'utilisation de celui-ci. Ils restent sceptiques quant à :

- une présumée acquisition de dextérité manuelle aussi rapide que les autres méthodes traditionnelles d'apprentissage,
- une présumée acquisition de dextérité manuelle aussi qualitative que les autres méthodes,
- le remplacement des méthodes traditionnelles par le simulateur.

A contrario, les étudiants sont majoritairement optimistes quant au/à :

- le rendu réaliste de l'arcade dentaire et des instruments du simulateur,
- la perspective du simulateur comme un atout dans l'apprentissage,
- leur satisfaction vis-à-vis de l'expérience.

A propos des sensations tactiles produites par le simulateur, les participants ont été enthousiasmés par le toucher de la dent virtuelle mais plus réservés quant aux sensations produites lors de la pénétration de la fraise dans la dent virtuelle.

Les remarques suivantes ont été les plus récurrentes :

- la couche émail paraît plus dure que sur une dent réelle et il faut exercer une pression plus importante pour la pénétrer ;
- absence de réelle sensation de différence de texture entre l'émail et la dentine, et entre la dentine saine et la dentine cariée ;
- certaines zones de surface sont plus résistantes que d'autres, comme un défaut du logiciel, obligeant le manipulateur à exercer une pression trop importante qui entraîne ensuite un enfoncement trop profond de la turbine. Au contraire, d'autres surfaces sont peu résistantes comme les crêtes marginales qui sont trop faibles.

De ce fait, la plupart des utilisateurs ont trouvé qu'il était difficile à premier abord de manipuler correctement le simulateur, et qu'ainsi plusieurs essais étaient nécessaires.

Les étudiants ont souvent regretté l'ergonomie qu'ils trouvent moins proche de la réalité clinique que celle des TP sur fantômes. Il a souvent été rapporté que les points d'appuis proposés sont moins bons. Cependant il a été suggéré que l'utilisation du simulateur apprend à l'étudiant de travailler à une certaine distance de la dent, ce qui est positif et l'empêche de prendre de mauvaises attitudes opératoires. Ces remarques rappellent les résultats de l'étude réalisée à l'Université de Griffith sur le Simodont®, où 80 % des professeurs ont regretté des problèmes techniques tels que la similitude de texture entre les différents tissus dentaires, les points d'appuis insuffisants, la taille trop importante de la turbine virtuelle, l'efficacité de fraisage non représentative des instruments et le poids trop faible du stylet représentant la turbine.²⁶

Enfin, la dernière idée qui a globalement été rapportée par les étudiants est que le simulateur ne devrait pas remplacer les techniques traditionnelles d'apprentissage préclinique mais devrait être pratiqué en complément de celles-ci.

2) Autour du rôle de la réalité virtuelle dans l'enseignement préclinique en odontologie

Le passage à la réalité virtuelle a été poussé par la limitation des approches traditionnelles pour reproduire de vrais cas cliniques, le manque de disponibilité en temps des enseignants, la limite des dents en ivoirine pour reproduire des expériences réalistes, et par la subjectivité de l'évaluation.³⁹

L'utilisation de la réalité virtuelle apporterait des avantages tels que le renforcement du savoir théorique en odontologie, l'utilisation correcte des instruments, des bonnes attitudes opératoires ergonomiques, l'auto-évaluation par les étudiants, une acquisition plus rapide de compétences motrices et une perception positive de l'apprentissage par les étudiants.⁴ Confronter les étudiants à leurs propres erreurs

leur permet d'inspecter visuellement leur travail comparé à un modèle idéal³⁴ et de le rectifier instantanément ce qui peut potentiellement augmenter leur capacité d'apprentissage et le développement de leurs compétences.²⁴ Un environnement préclinique contrôlé permet aux étudiants de pratiquer à leur propre rythme et de devenir compétent avant l'entrée en clinique, où les problèmes de gestion des patients et la peur de faire des erreurs peuvent compliquer l'exécution machinale des gestes techniques dentaires.³⁸

La réalité virtuelle pourrait jouer un rôle majeur dans l'enseignement en odontologie. Ces technologies sont susceptibles de changer l'apprentissage préclinique. Elles encouragent l'utilisation de formes d'évaluations plus objectives, lesquelles impliquent les étudiants dans un processus d'auto-évaluation afin d'identifier leurs besoins personnels de chacun. Ces innovations promettent une diminution du coût de l'enseignement en odontologie, mais aussi une augmentation de la qualité de l'enseignement en apportant de nouveaux outils pédagogiques pour les écoles d'odontologie.²

Cependant, pour utiliser un simulateur comme outil de mesure et d'évaluation des compétences motrices en dentisterie, il est nécessaire en premier lieu de déterminer si les mesures sont fiables et valides.³⁵ Si l'on compare les simulateurs à la combinaison des travaux sur fantômes et de la supervision par un enseignant, les simulateurs informent-ils les étudiants sur la forme finale de leur cavité, ou sur des erreurs conceptuelles telles que la posture, l'angle de leur turbine, ce qui impacte leur résultat ? Quand nous parlons de « validité », voulons-nous comparer le retour fourni par les simulateurs à un « vrai retour clinique » ou à une zone quantitative de volume dentaire retiré ? Pour le moment, le retour des simulateurs n'est pas assez complet pour remplacer l'enseignant et reste une activité nécessitant d'être supervisée. Sans cela, on peut imaginer qu'un étudiant réussisse à obtenir des scores élevés sur le simulateur, et pourtant être cliniquement mal préparé à ses traitements sur des vrais patients.³⁹ La simulation par réalité virtuelle ne serait pas appropriée comme seule méthode d'évaluation et de retour d'information pour les étudiants novices.^{24,34}

Il y a encore des questionnements dans la littérature sur le rôle de la simulation par réalité virtuelle dans l'enseignement en odontologie. Le but des simulateurs et ce qu'ils apportent au programme d'enseignement n'est pas encore clairement défini. Différents auteurs placent les simulateurs dans différents rôles : est-ce qu'ils simulent, avec autant de précision que possible, des situations cliniques dans le but d'offrir une pratique supplémentaire dans un environnement sans danger et éthique ? Sont-ils un outil pour repérer les étudiants qui ont un manque de dextérité manuelle et qui vraisemblablement seront en difficulté pour leurs examens de travaux précliniques ? Ou sont-ils un outil pédagogique offrant un environnement d'apprentissage sûr, éthique, plus économe et pédagogique ?³⁹ Est-ce que le but est que la réalité virtuelle un jour remplace les méthodes traditionnelles d'apprentissage, dans quel cas les remarques précédentes devraient être prise en compte ? Ou alors la réalité virtuelle serait-elle une opportunité de créer quelque chose de nouveau mais complémentaire aux méthodes traditionnelles,

et cette association créerait-elle de meilleurs résultats pédagogiques ?^{37,39} Alternier réalité virtuelle et instructions données par les enseignants pourrait donner des résultats plus positifs d'apprentissage.²⁴

3) Autour des futurs axes de recherche

La littérature met en évidence un certain nombre de points à améliorer. Des recherches complémentaires devraient être réalisées sur différents axes :

- établir des normes de formation pour les simulateurs dentaires ou leurs exercices associés ;
- définir dans quelle mesure la sous-représentation par le simulateur de certains concepts d'attitudes opératoires, tels que les points d'appuis et la posture de l'étudiant, impacte l'apprentissage de l'étudiant ;
- la profondeur des préparations devrait être prise en compte dans le score ;
- les méthodes de calcul de score des simulateurs n'ont pas été validés par rapport aux performances cliniques réelles et au retour des enseignants en clinique ;
- une synergie entre les enseignants en clinique et le retour du simulateur devrait être au futur plus explorée afin de maximiser la pédagogie et l'utilisation efficaces des ressources.³⁹

Des questions de recherche à prendre en considération pourraient être : Combien d'heures d'entraînement sur simulateur est suffisant à la majorité des étudiants pour atteindre le niveau requis ? Si le simulateur est efficace, permettrait-il de réduire la plage horaire d'entraînement ? Quelle serait la place du simulateur dans l'enseignement préclinique : vaudrait-il mieux l'utiliser de façon intensive au début ou uniquement comme première approche d'apprentissage d'une nouvelle technique ? Certains étudiants répondent-ils mieux que d'autres à l'entraînement par simulation ?³ En terme d'avancée technologique, des progrès dans le feedback sensoriel et dans l'ergonomie seraient bénéfiques.³ Une base de preuve montrant l'efficacité de la simulation haptique comparée aux techniques traditionnelles manque encore. Plus études comparant l'acquisition de compétences entre différents systèmes de simulation virtuelle et les techniques traditionnelles ont besoin d'être réalisées.

V. Conclusion

L'acquisition d'une dextérité manuelle et de compétences cliniques est indispensable à la formation du futur dentiste. L'enseignement préclinique y joue un rôle fondamental, préparant les étudiants aux difficultés de la clinique. Traditionnellement cet apprentissage se réalise sur des simulateurs physiques tels que les fantômes, mais les simulateurs virtuels à technologie haptique sembleraient se démarquer dans l'enseignement préclinique.

Notre étude réalisée sur le simulateur VirTeaSy© avait pour but de déterminer si ce simulateur est capable de discriminer des manipulateurs de différents niveaux en odontologie. Les différences significatives de résultats entre les 2^{ième} et les 4^{ième} années et entre les 2^{ième} années et jeunes diplômés sont en accord avec cette hypothèse et encourage la validité de ce simulateur comme outil pédagogique. L'absence de significativité entre tous les groupes et la différence significative de résultats entre les non-odontologistes et les 2^{ième} années suggèrent certaines limites de cette technologie dans son potentiel manque d'approche clinique. Si les participants à l'étude ont été plutôt satisfaits de l'expérience, ils notent cependant des défauts techniques du logiciel et soutiennent que le simulateur haptique ne devrait pas remplacer les techniques traditionnelles précliniques mais être utilisé en complément de celles-ci. Cette idée est largement partagée dans la littérature qui met en évidence le manque actuel de preuve pour remplacer les simulateurs physiques par les simulateurs haptiques.

VI. Bibliographie

1. Isaza-Restrepo, A., Gómez, M. T., Cifuentes, G. & Argüello, A. The virtual patient as a learning tool: a mixed quantitative qualitative study. *BMC Med. Educ.* **18**, 297 (2018).
2. Aben-Danan, Y. La simulation dans l'apprentissage de l'endodontie. 83.
3. Perry, S., Bridges, S. M. & Burrow, M. F. A Review of the Use of Simulation in Dental Education. *Simul. Healthc. J. Soc. Simul. Healthc.* **10**, 31–37 (2015).
4. Dutã, M. *et al.* An Overview of Virtual and Augmented Reality in Dental Education. **10**, 8 (2011).
5. Joda, T., Gallucci, G. O., Wismeijer, D. & Zitzmann, N. U. Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review. *Comput. Biol. Med.* **108**, 93–100 (2019).
6. Ziv, A., Wolpe, P. R., Small, S. D. & Glick, S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Acad. Med. J. Assoc. Am. Med. Coll.* **78**, 783–788 (2003).
7. Haute Autorité de Santé - Simulation en santé. https://www.has-sante.fr/jcms/c_930641/fr/simulation-en-sante.
8. La simulation en réalité virtuelle: une nouvelle approche pédagogique en odontologie. <http://pepite.univ-lille2.fr/notice/view/UDSL2-workflow-10621>.
9. Aebersold, M. The History of Simulation and Its Impact on the Future. *AACN Adv. Crit. Care* **27**, 56–61 (2016).
10. Ullrich, S. & Kuhlen, T. Haptic palpation for medical simulation in virtual environments. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* **18**, 617–625 (2012).
11. Delorme, S., Laroche, D., DiRaddo, R. & Del Maestro, R. F. NeuroTouch: a physics-based virtual simulator for cranial microneurosurgery training. *Neurosurgery* **71**, 32–42 (2012).
12. Steinberg, A. D. Assessment of Faculty Perception of Content Validity of PerioSim©, a Haptic-3D Virtual Reality Dental Training Simulator. *J. Dent. Educ.* **71**, 9 (2007).
13. Yin, M. S., Haddawy, P., Suebnukarn, S. & Rhiemora, P. Automated outcome scoring in a virtual reality simulator for endodontic surgery. *Comput. Methods Programs Biomed.* **153**, 53–59 (2018).
14. Joseph, D. *et al.* Relative Contribution of Haptic Technology to Assessment and Training in Implantology. *BioMed Res. Int.* **2014**, 1–9 (2014).

15. Miki, T. *et al.* Development of a virtual reality training system for endoscope-assisted submandibular gland removal. *J. Cranio-Maxillofac. Surg.* **44**, 1800–1805 (2016).
16. Quinton, A. Les gestes : comment les enseigner, Les apprendre et les mémoriser durablement. 9 (2015).
17. Baumard, J. *et al.* Tool use disorders in neurodegenerative diseases: Roles of semantic memory and technical reasoning. *Cortex* **82**, 119–132 (2016).
18. Lim, G. *et al.* Low-Fidelity Haptic Simulation Versus Mental Imagery Training for Epidural Anesthesia Technical Achievement in Novice Anesthesiology Residents: A Randomized Comparative Study. *Anesth. Analg.* **122**, 1516–1523 (2016).
19. Palincsar, A. S. The Role of Dialogue in Providing Scaffolded Instruction. *Educ. Psychol.* **21**, 73–98 (1986).
20. Cocks, M., Moulton, C.-A., Luu, S. & Cil, T. What Surgeons can Learn From Athletes: Mental Practice in Sports and Surgery. *J. Surg. Educ.* **71**, 262–269 (2014).
21. Malouin, F., Jackson, P. L. & Richards, C. L. Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Front. Hum. Neurosci.* **7**, (2013).
22. Joseph, D. Impact de la simulation haptique dans l’enseignement en odontologie. 153.
23. Fugill, M. Defining the purpose of phantom head. *Eur. J. Dent. Educ.* **17**, e1–e4 (2013).
24. Plessas, A. Computerized Virtual Reality Simulation in Preclinical Dentistry: Can a Computerized Simulator Replace the Conventional Phantom Heads and Human Instruction? *Simul. Healthc. J. Soc. Simul. Healthc.* **12**, 332–338 (2017).
25. Wang, D., Li, T., Zhang, Y. & Hou, J. Survey on multisensory feedback virtual reality dental training systems. *Eur. J. Dent. Educ.* **20**, 248–260 (2016).
26. Bakr, M. M., Massey, W. & Alexander, H. Evaluation of Simodont® Haptic 3D virtual reality dental training simulator. *Int. J. Dent. Clin.* **5**, (2013).
27. Buchanan, J. A. Use of Simulation Technology in Dental Education. *J. Dent. Educ.* **65**, 7 (2001).
28. Roy, E., Bakr, M. M. & George, R. The need for virtual reality simulators in dental education: A review. *Saudi Dent. J.* **29**, 41–47 (2017).

29. Escobar-Castillejos, D., Noguez, J., Neri, L., Magana, A. & Benes, B. A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training. *J. Med. Syst.* **40**, 104 (2016).
30. Schönwetter, D. J., Reynolds, P. A., Eaton, K. A. & De VRIES, J. Online learning in dentistry: an overview of the future direction for dental education: ONLINE LEARNING IN DENTISTRY. *J. Oral Rehabil.* **37**, 927–940 (2010).
31. Zendejas, B., Brydges, R., Wang, A. T. & Cook, D. A. Patient Outcomes in Simulation-Based Medical Education: A Systematic Review. *J. Gen. Intern. Med.* **28**, 1078–1089 (2013).
32. Wierinck, E. R., Puttemans, V., Swinnen, S. P. & Steenberghe, D. van. Expert Performance on a Virtual Reality Simulation System. *J. Dent. Educ.* **71**, 759–766 (2007).
33. Buchanan, J. A. Experience with Virtual Reality-Based Technology in Teaching Restorative Dental Procedures. *J. Dent. Educ.* **68**, 1258–1265 (2004).
34. 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.* **7**, 164–169 (2003).
35. Ben-Gal, G., Weiss, E. I., Gafni, N. & Ziv, A. Testing manual dexterity using a virtual reality simulator: reliability and validity. *Eur. J. Dent. Educ.* **17**, 138–142 (2013).
36. Mirghani, I. *et al.* Capturing differences in dental training using a virtual reality simulator. *Eur. J. Dent. Educ.* **22**, 67–71 (2018).
37. Murbay, S., Neelakantan, P., Chang, J. W. W. & Yeung, S. “Evaluation of the introduction of a dental virtual simulator on the performance of undergraduate dental students in the pre-clinical operative dentistry course”. *Eur. J. Dent. Educ.* *eje.12453* (2019) doi:10.1111/eje.12453.
38. Eve, E. J., Cormier, J. & Karimbux, N. Y. Performance of Dental Students Versus Prosthodontics Residents on a 3D Immersive Haptic Simulator. *J. Dent. Educ.* **78**, 8 (2014).
39. Towers, A., Field, J., Stokes, C., Maddock, S. & Martin, N. A scoping review of the use and application of virtual reality in pre-clinical dental education. *Br. Dent. J.* **226**, 358–366 (2019).

Collège des Sciences de la Santé

UFR des Sciences Odontologiques

Serment

En présence de mes Maîtres et de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de l'art dentaire.

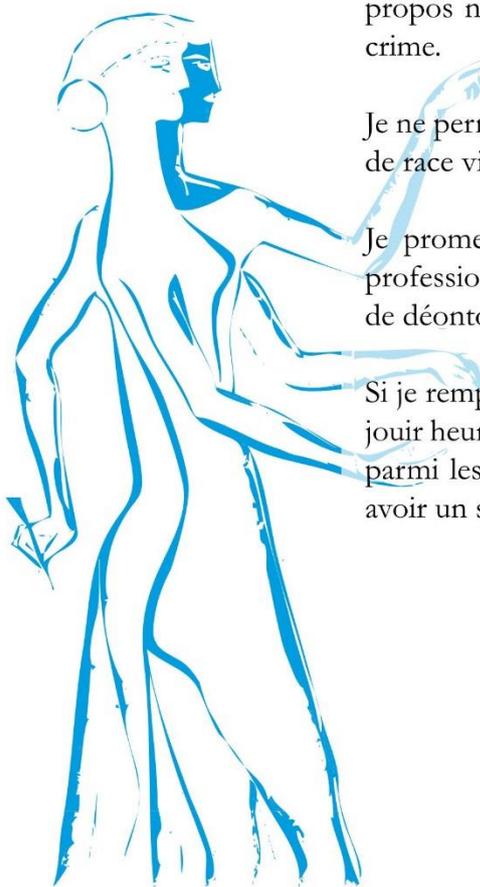
Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un honoraire au-dessus de mon travail. Ma langue taira les secrets qui me seront confiés. Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe.

Mes connaissances et mon état ne serviront ni à diffuser des propos non avérés, ni à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des conditions de croyance, de nation et de race viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Je promets et je jure de conformer strictement ma conduite professionnelle aux principes et aux règles prescrites par le code de déontologie.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné de jouir heureusement de la vie et de ma profession, honoré à jamais parmi les hommes. Si je le viole et que je me parjure, puissé-je avoir un sort contraire.



Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, la Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

Titre : La réalité virtuelle dans l'enseignement préclinique en Dentisterie Restauratrice : le simulateur haptique VirTeaSy Dental© est-il un outil discriminant et valide pour apprécier les performances des étudiants ?

Résumé :

L'acquisition d'une dextérité manuelle et sensitive est primordiale dans l'enseignement préclinique des futurs dentistes. Pour répondre à cette nécessité, de nombreuses sociétés ont créé des simulateurs, associant réalité virtuelle à un bras à retour de force. Si les sensations tactiles créées par ces simulateurs sont « similaires » à celles ressenties en clinique, ce dernier devrait être discriminant entre des utilisateurs de différents niveaux cliniques. Le but de cette thèse était de tester le potentiel discriminant du simulateur haptique VirTeaSy© entre des utilisateurs de différents niveaux d'expérience. Cinquante-six volontaires répartis par groupes d'expérience (non-odontologues, 2^{ème}, 4^{ème} et 6^{ème} année en Odontologie et jeunes praticiens chirurgiens-dentistes) ont réalisé trois fois le même exercice de curetage d'une cavité de classe I et ont répondu à un questionnaire sur leur expérience. Dans l'étude du pourcentage de cible carieuse éliminée, des différences significatives ont été obtenues entre les étudiants en 2^{ème} année et ceux de 4^{ème} année et avec les jeunes praticiens, mais également entre les non-odontologues et les étudiants en 2^{ème} année. Ces résultats préliminaires suggèrent que ce simulateur serait discriminant mais avec certaines limites. La littérature semble s'accorder sur le fait qu'à l'heure actuelle la simulation haptique serait un outil pédagogique prometteur dans l'enseignement préclinique en odontologie, à utiliser en complément des méthodes d'apprentissage traditionnelles plutôt qu'en remplacement de celles-ci.

Mots clés :

Pédagogie – simulation numérique – réalité virtuelle – odontologie restauratrice - apprentissage

Title: Virtual reality in restorative dentistry preclinical education: is the haptic simulator VirTeaSy Dental© a discriminating and valid tool to value student's performance?

Abstract:

The acquisition of manual and sensitive dexterity is essential for the futur dentist student's preclinical education. To meet this requirement, many companies created simulators combining virtual reality with a feedback haptic interface. If the tactile experiences provided by these simulators are similar to the clinical ones, we could expect haptic simulator discrimination between users from several clinical levels. The aim of this thesis was to assess the discriminating capacity of the VirTeaSy© haptic simulator between users from different experience levels. Fifty-six volunteers have been divided into groups based on their experience (non-dental, 2nd, 4th and 6th year dental students and young dentists) and have performed an exercise three times of class I cavity curetting and then have answered a questionnaire about their experience. About the percentage of target carious eliminated, significant differences have been shown between the 2nd and 4th year students and young dentists, but also between the non-dental and 2nd year students. These results suggest that this simulator would be discriminating but it has some limits. Literature seems to agree on the fact that haptic simulation would be a promising pedagogical tool for preclinical dental education, to be used as a complement to conventional teaching methods rather than to replace them.

Keywords:

Pedagogy – numerical simulation – virtual reality – restorative dentistry - learning