

UNIVERSITE DE LILLE

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2022

N°:

**THESE POUR LE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 04 Mai 2022

Par Amaury de La Fontaine

Né le 22 août 1982 à Saint Quentin – France

Apports et perspectives de la réalité virtuelle dans le cadre de la
formation des étudiants en Chirurgie Dentaire

JURY

Président : Madame la Professeure Caroline DELFOSSE

Assesseurs : Madame le Docteur Emmanuël BOCQUET

Monsieur le Docteur Thomas TRENTESAUX

Monsieur le Docteur Thomas MARQUILLIER

Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directrice Générale des Services de l'Université	:	M-D. SAVINA
Doyen UFR3S	:	Pr. D. LACROIX
Directrice des Services d'Appui UFR3S	:	G. PIERSON
Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S	:	Pr. C. DELFOSSE
Responsable des Services	:	M. DROPSIT
Responsable de la Scolarité	:	G. DUPONT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	Responsable du Département d'Odontologie Pédiatrique Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable du Département d'Orthopédie Dento-Faciale
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
X. COUTEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELGAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDEBERT	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
W. PACQUET	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable du Département de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Aux membres du jury,

Madame la Professeure Caroline DELFOSSE,

Professeure des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Développement, Croissance et Prévention

Département Odontologie Pédiatrique

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille 2 (mention Odontologie)

Diplôme d'Etudes Approfondies Génie Biologie & Médical - option Biomatériaux

Maîtrise de Sciences Biologiques et Médicales

Diplôme d'Université « Sédation consciente pour les soins bucco-dentaires »
(Strasbourg I)

Doyen du Département « faculté d'odontologie » de l'UFR3S - Lille

Je vous suis reconnaissant pour l'honneur que vous me faites de présider mon jury de thèse, pour votre écoute, et bien évidemment pour tous vos enseignements. Je garde en mémoire en particulier les vacations MEOPA avec vous, très instructives en terme de pédagogie et d'empathie à l'égard des patients à besoins spécifiques. À travers ce travail, veuillez trouver, chère Professeure, l'expression de mon respect sincère.

Madame le Docteur Emmanuël BOCQUET

Maître de Conférences des Universités – Praticien hospitalier des CSERD

Section Développement, Croissance et Prévention

Département Orthopédie Dento-Faciale

Docteur en Chirurgie Dentaire

Certificat d'Etudes Cliniques Spéciales Mention Orthodontie

Certificat d'Etudes Supérieures de Biologie de la Bouche

Certificat d'Etudes Supérieures d'Orthopédie Dento-Faciale

Master 2 Recherche Biologie Santé

Maîtrise des Sciences Biologiques et Médicales

Responsable du Département d'Orthopédie Dento-Faciale

Coordonnateur inter-régional du Diplôme d'Etudes Spécialisées d'Orthopédie

Dento-Faciale

Vous avez pris part à ce projet dès ses premières étapes en mars 2017 en m'accordant votre confiance au jury d'admission en passerelle pour l'intégration en troisième année d'odontologie. Je tenais tout particulièrement à clore avec vous ce cheminement à la fois long et rythmé, et je suis heureux et honoré que vous ayez accepté de m'accompagner jusqu'à son terme. Je vous suis profondément reconnaissant pour vos enseignements, vos conseils avisés et pragmatiques, et la bienveillance dont vous savez faire preuve.

Monsieur le Docteur Thomas TRENTESAUX

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Développement, Croissance et Prévention

Département Odontologie Pédiatrique

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Ethique et Droit Médical de l'Université Paris Descartes (Paris V)

Certificat d'Etudes Supérieures de Pédodontie et Prévention – Paris Descartes (Paris V)

Diplôme d'Université « Soins Dentaires sous Sédation » (Aix-Marseille II)

Master 2 Ethique Médicale et Bioéthique Paris Descartes (Paris V)

Formation certifiante « Concevoir et évaluer un programme éducatif adapté au contexte de vie d'un patient »

Tu m'as fait l'honneur d'accepter la direction de ma thèse, et ce en dépit de la longue liste d'attente des thésards qui gravitent autour de toi. Tu as même œuvré pour qu'elle prenne un sens tout particulier qui fait le lien entre mes premières études d'ingénierie et celles-ci, et je t'en suis sincèrement reconnaissant. Je reste admiratif devant la passion que tu mets dans la transmission de tes connaissances, tes conseils précieux, ton calme en toutes circonstances et la bonne humeur qui te caractérise. Je te suis reconnaissant pour tout ce que tu m'as apporté dès les premières étapes de ce projet, et forme le vœu que cette thèse serve de première pierre au profit de projets de plus grande envergure au sein de notre université d'excellence.

Avec toute mon amitié.

Monsieur le Docteur Thomas MARQUILLIER

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Section Développement, Croissance et Prévention

Département d'Odontologie Pédiatrique

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Santé Publique

Spécialiste Qualifié en Médecine Bucco-Dentaire

Certificat d'Etudes Supérieures Odontologie Pédiatrique et Prévention

Attestation Universitaire soins dentaires sous sédation consciente au MEOPA

Master 1 Biologie Santé – mention Ethique et Droit de la Santé

Master 2 Santé Publique – spécialité Education thérapeutique et éducations en santé

Formation Certifiante en Education Thérapeutique du Patient

Diplôme du Centre d'Enseignement des Thérapeutiques Orthodontiques, orthopédiques et fonctionnelles

Lauréat du Prix Elmex® de la Société Française d'Odontologie Pédiatrique

Responsable de l'Unité Fonctionnelle d'Odontologie Pédiatrique – CHU de Lille

J'ai le plaisir et l'honneur de te compter parmi les membres de mon jury de thèse. Toi aussi tu as très tôt manifesté de l'intérêt et de la bienveillance envers ce projet, et je t'en suis reconnaissant. Je salue également la qualité de tes enseignements, ton dynamisme, et ta volonté de faire bien sans concession.

J'ai eu le privilège au fil des mois de te croiser en dehors de la sphère strictement universitaire, et suis heureux de l'amitié qui en est née.

Au Docteur Jérôme VANDOMME,

Le hasard des calendriers me prive du plaisir de te compter parmi les membres de ce jury. À défaut de ne pouvoir le faire de vive voix, je tenais à t'adresser ces quelques mots pour te témoigner toute ma reconnaissance. Pour ton coaching pratique à mon arrivée en P3, pour tes conseils de plans de traitement complexes en clinique, et encore tout récemment pour cette thèse. Ton expérience et ton expertise sur le domaine de la simulation, notamment virtuelle, ont été précieuses. Tu t'es toujours rendu disponible et très réactif pour nos échanges en visio ou par mail. Je sais le temps et l'énergie que tu as déjà investis dans le domaine de la simulation numérique, et j'espère que tu trouveras dans cette thèse des éléments exploitables pour répondre au mieux aux besoins en formation pratique de notre université.

***À ma femme,
À mon père,***

À ma famille, à mes amis,

Sigles

ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Electroniques, des Postes et de la distribution de la Presse
ARH	Agence Régionale d'Hospitalisation, (<i>devenue ARS depuis 2010</i>)
ARS	Agence Régionale de Santé
CCAM	Classification Commune des Actes Médicaux
CERIMES	Centre de Ressources et d'Informations sur le Multimédia pour l'Enseignement Supérieur
CFR	<i>Case Fatality Rate</i>
CHR	Centre Hospitalier Régional
CHU	Centre Hospitalo-Universitaire
CIM	Classification Internationale des Maladies
CME	Commission Médicale d'Etablissement
CPIAS	Centre d'appui pour la Prévention des Infections Associés aux Soins
CVRS	<i>Computered Virtual Reality Simulator</i>
DIM	Département de l'Information Médicale
DMI	Dispositifs Médicaux Implantables
DPC	Développement Professionnel Continu
DREES	Direction de la Recherche, des Etudes, de l'Evaluation et des Statistiques
DU	Diplôme Universitaire
EIAS	Evènement Indésirable Associé aux Soins
EPI	Equipement de Protection Individuelle
FEDER	Fond Européen de Développement Régional
FMC	Formation Médicale Continue
GT	Groupe de Travail
HAS	Haute Autorité de Santé

HCSP	Haut Conseil de la Santé Publique
MCU	Maître de Conférences des Universités
MERRI	Mission d'Enseignement Recherche Référence et Innovation
MOOC	<i>Massiv Open Online Courses</i> , Cours disponible en ligne
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economique
OGDPC	Organisme de Gestion du Développement Professionnel Continu
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONCD	Ordre National des Chirurgiens-Dentistes
ONDPS	Observatoire National Démographique des Professionnels de Santé
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PH	Praticien Hospitalier
PMSI	Programme de Médicalisation des Systèmes d'Information
PRESAGE	Plateforme de Recherche et d'Enseignement par la Simulation pour l'Apprentissage des Attitudes et des Gestes
RA	Réalité Augmentée (<i>AR en Anglais</i>)
RMM	Revue de Mortalité et de Morbidité
RV	Réalité Virtuelle (<i>VR en Anglais</i>)
SGBD	Système de Gestion de Bases de Données
UM	Unité Médicale
WHO	<i>World Health Organization (voir OMS)</i>
3D	[dans les] 3 Dimensions de l'espace

Table des matières

Sigles	12
Table des matières.....	14
Introduction	16
1 Contextes et nouveaux enjeux de la formation des étudiants en odontologie 17	
1.1 Contexte démographique et générationnel	17
1.1.1 Augmentation des effectifs étudiants en facultés d'odontologie ...	17
1.1.2 Intérêt grandissant pour les nouvelles technologies numériques .	18
1.2 Contextes des ressources formatives	19
1.2.1 Les moyens humains.....	19
1.2.2 Les moyens matériels.....	20
1.3 Contexte sanitaire : de nouvelles contraintes à intégrer.....	21
1.3.1 Contraintes d'ordre général	21
1.3.2 Contraintes spécifiques	22
1.4 Contexte sociétal et juridique	25
1.4.1 Une volonté d'être plus aguerris pour les débuts en clinique et en cabinet 25	
1.4.2 La recherche de davantage d'équité pour les évaluations pratiques 25	
1.4.3 La judiciarisation de la société.....	26
1.5 Contexte universitaire et industriel : la globalisation	27
2 Apports du numérique par rapport aux outils pédagogiques conventionnels 28	
2.1 Généralités.....	28
2.1.1 Définitions.....	28
2.1.2 Les différents types de simulation en santé.....	30
2.1.3 Histoire de la simulation dentaire.....	32
2.2 Inconvénients du numérique dans le cadre de la formation en santé .	35
2.2.1 Le retour d'expérience des simulateurs numériques Lillois	35
2.2.2 Un niveau de réalisme perfectible selon les modèles.....	36
2.2.3 Les difficultés de financement	37
2.2.4 Un entraînement préclinique incomplet	38
2.2.5 Une supervision informatisée potentiellement excessive	39
2.2.6 La question de l'auto-évaluation	39
2.3 Avantages du numérique dans le cadre de la formation en santé	40

2.3.1	Un apprentissage préclinique sécurisé.....	40
2.3.2	Un apprentissage plus efficient	40
2.3.3	Un apprentissage moins sollicitant pour les enseignants	41
2.3.4	Un apprentissage par l'erreur, standardisé et objectif	42
2.3.5	Multiplicité et évolutivité des contenus.....	43
2.3.6	Les avantages de la dématérialisation : économie et accessibilité.....	43
2.3.7	Promotion de l'excellence et attractivité	44
2.3.8	Déontologie et éthique.....	45
3	Etude d'applicabilité à la formation en odontologie	46
3.1	Les principaux objectifs pédagogiques en odontologie	46
3.2	Cahier des charges d'un outil pédagogique numérique idéal.....	46
3.3	Quels types de simulation privilégier ?.....	47
3.3.1	Outil d'aide au choix d'une technique de simulation	47
3.3.2	Le choix entre simulateurs dentaires physiques et numériques ...	48
3.3.3	Le choix entre les différents simulateurs dentaires numériques ...	51
3.3.4	Quelles alternatives aux simulateurs numériques pleine échelle ? 57	
3.4	Analyse des risques et points de vigilance.....	61
3.4.1	Fiabilité	61
3.4.2	Ressources humaines qualifiées et en nombre suffisant.....	62
3.4.3	Viabilité technique et financière	63
3.4.4	Accessibilité et disponibilité des outils informatiques nécessaires	65
3.5	Analyse des opportunités et perspectives.....	65
3.5.1	Ce que recommande la Haute Autorité de Santé	65
3.5.2	Ce qu'observe la Haute Autorité de Santé	68
3.5.3	Exemples de projets porteurs en France	71
3.5.4	Perspectives de partenariats techniques et financiers.....	73
3.5.5	Opportunité de renouvellement du parc existant	75
3.5.6	Perspectives d'évolutions technologiques	76
	Conclusion	78
	Liste des tables	80
	Liste des figures	81
	Références bibliographiques.....	82

Introduction

La médecine buccodentaire est une discipline de santé éminemment exigeante en terme de compétences psychomotrices pour la prise en charge des patients en toute sécurité. L'enjeu est de mener à bien les thérapeutiques indiquées sans geste iatrogène ni perte de chance. De fait, la formation des étudiants en chirurgie dentaire comporte une composante pratique omniprésente pour accompagner l'apprenant dans le développement des habiletés nécessaires.

Dans ce but, les méthodes pédagogiques précliniques ont très tôt fait appel à la simulation. Longtemps cette simulation a reposé exclusivement sur les simulateurs de type mannequins, dits à « têtes fantômes ». Aujourd'hui, dans les universités du monde entier, les simulateurs numériques de réalité virtuelle sont en plein essor. La littérature scientifique se penche également de plus en plus sur ces outils et sur leurs utilisations.

Ces dernières années, l'enseignement dentaire a par ailleurs pris conscience d'un ensemble de nouveaux enjeux auxquels il doit s'adapter. Ces enjeux sont de toutes sortes (démographiques, économiques, sanitaires, juridiques...) et requièrent d'étudier les possibles évolutions d'équipements et de méthodes pédagogiques.

Ce travail a pour objet de dresser un état de l'art des différents simulateurs numériques existants, et d'en analyser les atouts, les limites, ainsi que les alternatives. Il ambitionne également de mener l'analyse des risques et des opportunités associées à la mise en œuvre d'un nouveau type de programme de simulation et de mettre ces éléments à la disposition des enseignants et décideurs universitaires.

1 Contextes et nouveaux enjeux de la formation des étudiants en odontologie

1.1 Contexte démographique et générationnel

1.1.1 Augmentation des effectifs étudiants en facultés d'odontologie

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, plus de 60 % des enfants dans le monde souffrent de caries dentaires, et cette proportion monte jusqu'à près de 100 % pour les adultes. Dans la tranche d'âge [35 - 44 ans], près de 20 % souffrent d'une pathologie bucco-dentaire sévère, pouvant aboutir à la perte de dents. Quant à la population âgée de 65 à 74 ans, le taux d'édentement total atteint près de 30 % [1]. Dans un contexte de démographie croissante et vieillissante, auquel s'ajoute une répartition inhomogène des soignants sur le territoire, les besoins en soins bucco-dentaires, et donc en formation de chirurgiens-dentistes resteront durablement sur une tendance haussière.

En réponse à ces constats, le numérus clausus en études de santé a été progressivement augmenté depuis le début des années 2000 (Figure 1) pour être finalement supprimé en 2020 [2].

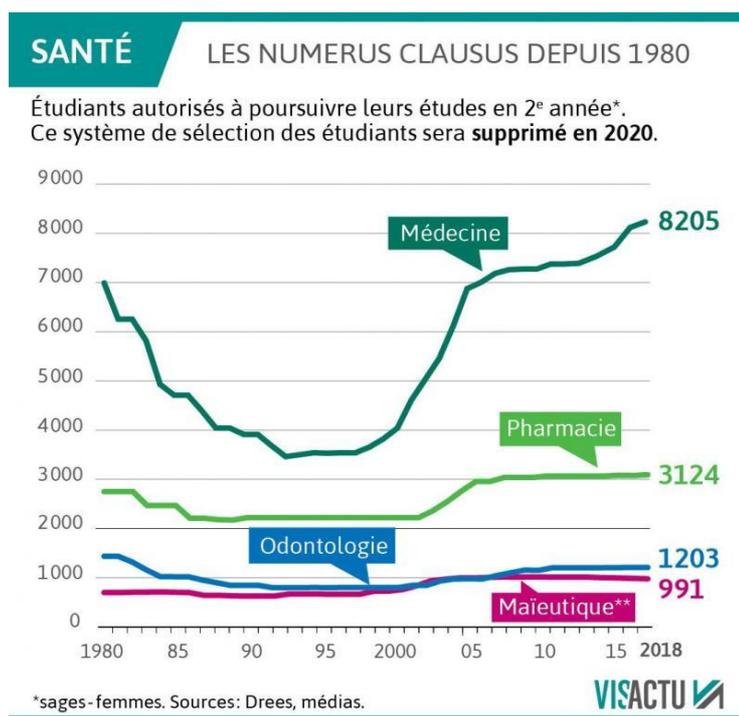


Figure 1 : Evolution du numérus clausus en santé en France depuis 1980, source DREES.

La figure ci-dessus montre bien cette augmentation des effectifs étudiants dans les filières de santé, y compris en odontologie. Cette tendance est par ailleurs accentuée par d'autres éléments de contexte. Il y a une dizaine d'années en effet, on a pu observer l'arrivée dans le supérieur des générations issues des politiques de démocratisation scolaire mises en place dans les années 1980 et, plus récemment, des baby-boomers des

années 2000. En 2019, la France comptait près de 2,8 millions d'étudiants, soit une augmentation de 21,3 % sur les dix dernières années (Figure 2) [3].

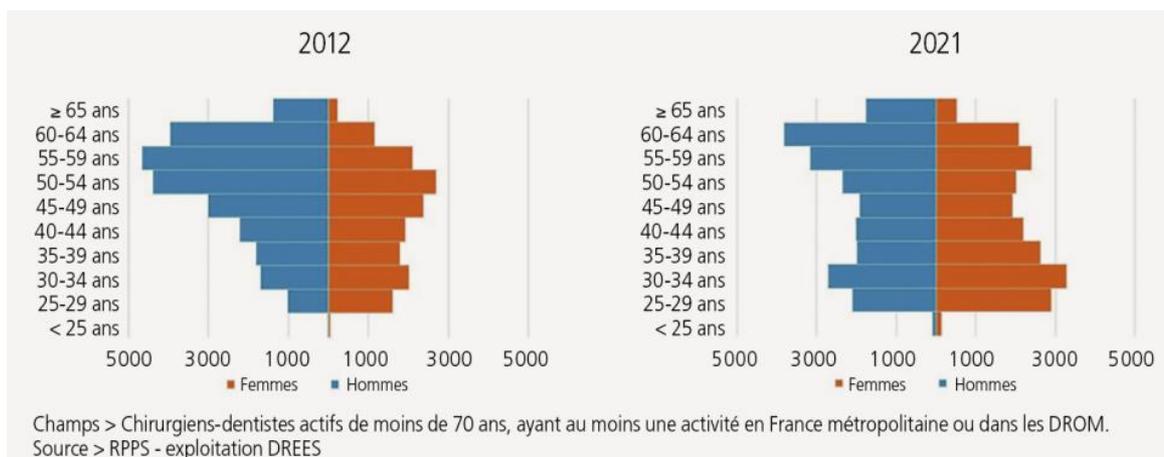


Figure 2 : Pyramides des âges des chirurgiens-dentistes, en 2012 et 2021, source DREES.

Parallèlement à cela, les besoins en formation initiale des chirurgiens-dentistes se voient eux aussi accentués par certains phénomènes générationnels.

D'une part, la vague de départs en retraites des papy-boomers de la génération d'après-guerre a été accentuée et anticipée ces dernières années. Ceci est probablement lié à l'effet conjugué des interrogations vis-à-vis de la mise en œuvre de la nouvelle Convention CCAM et des contraintes associées à la crise sanitaire de la COVID-19.

D'autre part le rajeunissement et la féminisation de la profession contribuent indirectement au besoin en nouveaux praticiens. L'âge moyen des praticiens est aujourd'hui en effet de 45,8 ans, soit en diminution de 2,4 ans depuis 2012, et la féminisation atteint quant à elle près de 55 % pour les 30 - 34 ans [4]. Or dans tous les domaines d'activité professionnelle, cette nouvelle génération est en recherche d'un meilleur équilibre entre vie professionnelle et vie privée, ce qui se traduit entre autres par une diminution des amplitudes horaires assurées en cabinet.

La faculté de chirurgie dentaire de Lille figure ainsi, avec Paris, sur le podium français du plus grand nombre d'étudiants par promotion [5]. A Lille, où sont également formés les étudiants rouennais, la taille des promotions a d'ores et déjà presque doublé depuis le début des années 2000, tant et si bien que la formation de promotions dentaires si nombreuses est devenue un véritable challenge.

1.1.2 Intérêt grandissant pour les nouvelles technologies numériques

Comme toutes les professions de santé, la médecine bucco-dentaire est en constante évolution à l'échelle mondiale, encouragée par les innovations technologiques dans toutes les spécialités.

Les technologies du numérique se généralisent et deviennent omniprésentes dans les sphères professionnelles et privées, et ce de plus en plus tôt. En effet selon l'Autorité de Régulation des Communications

(Baromètre du numérique 2021, ARCEP), 84% des plus de 12 ans utilisent un téléphone portable. Par ailleurs, l'acquisition du premier téléphone portable est de plus en plus précoce. De même les 7-12 ans passent en moyenne 6h10 par semaine sur internet et les 1-6 ans 4h37 [6].

Les jeunes générations sont de fait non seulement à l'aise avec ces technologies [7], mais sont très en demande de ce type de supports dans le cadre pédagogique et professionnel. Les cours magistraux en amphithéâtre sont délaissés au profit de contenus plus interactifs voire disponibles à la demande, comme les e-learning ou les MOOCs, permettant une assimilation à un rythme personnalisé et étant compatibles avec les contraintes personnelles, tels que les « jobs » étudiants par exemple.

1.2 Contextes des ressources formatives

1.2.1 Les moyens humains

La majorité des formateurs est représentée par des praticiens hospitaliers (Figure 3), qu'il s'agisse de formateurs ponctuels ou permanents. Ces derniers suivent davantage les formations à la simulation. Parmi les personnes formées, environ la moitié suit des formations diplômantes [8].

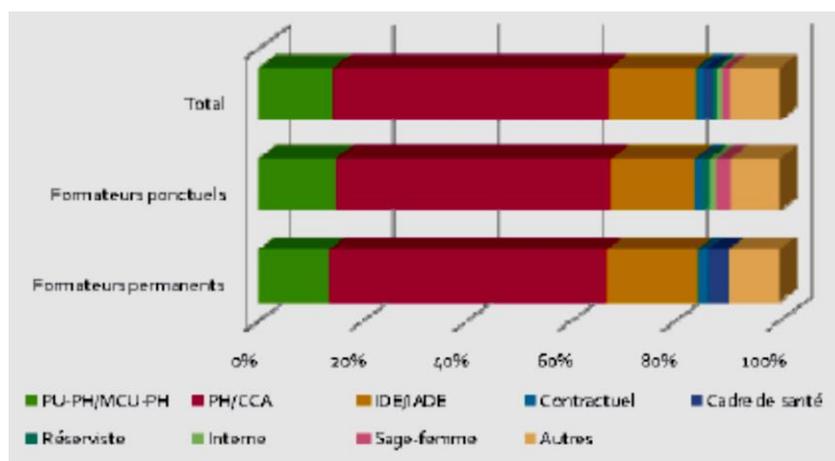


Figure 3 : Répartition des formateurs selon leur profil, source HAS.

Or les universités font face à des difficultés récurrentes pour recruter et conserver les personnels enseignants [7], avec notamment un turn over important des enseignants attachés, pour des raisons entre autres d'attractivité, ainsi que d'impossibilité de cumul avec un exercice libéral pour les titulaires.

Dans un contexte d'accroissement des effectifs par promotion, le ratio enseignants/étudiants s'en voit de plus en plus réduit, ce qui soulève un véritable problème d'encadrement des formations initiales en odontologie [9].

A Lille par exemple, depuis quelques années les promotions de deuxième année universitaire avoisinent les 140 étudiants, voire plus. Lors des travaux pratiques de dentisterie restauratrice, le nombre d'encadrants est en moyenne de 4 par sous-groupe de 35 à 36 étudiants, ce qui équivaut à un ratio de 1 enseignant pour 9 étudiants [5].

Avec la diversification et la complexification des programmes d'études dentaires se pose également la question de la formation et du maintien de compétences des enseignants vis-à-vis des nouvelles procédures et nouvelles approches pédagogiques, ainsi que de l'utilisation efficace des temps de formation qui est devenue une nécessité croissante [10].

1.2.2 Les moyens matériels

Le centre de simulation de la faculté de chirurgie dentaire de Lille, bien que figurant parmi les plus importants d'Europe [5], est sous dimensionné au regard du nombre d'étudiants à former chaque année. Et la tendance est à la dégradation, compte tenu d'une part des augmentations prévues d'effectifs en études de santé, et d'autre part des budgets prévisionnels insuffisants pour l'enseignement supérieur.

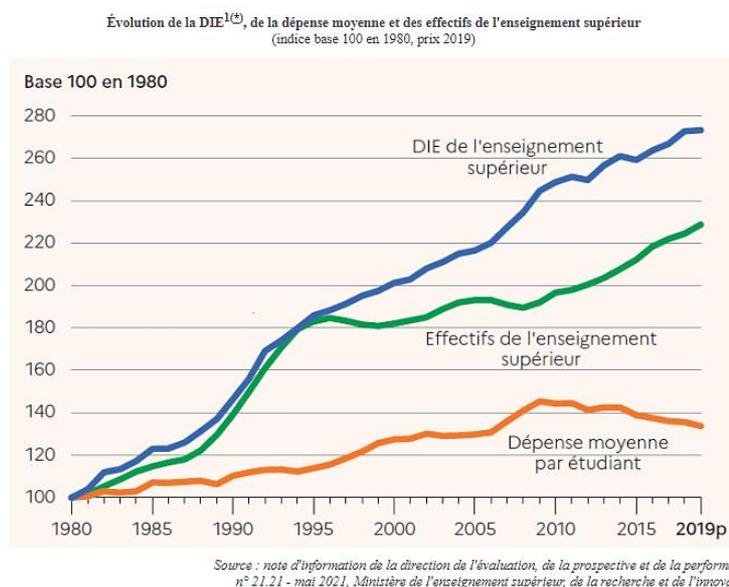


Figure 4 : Evolution des dépenses et effectifs de l'enseignement supérieur en France, d'après [3].

La figure ci-dessus est issue du projet de loi de finances 2022 pour l'enseignement supérieur [3]. On observe clairement que depuis une dizaine d'années, le budget moyen par étudiant diminue (courbe en orange). Le rapporteur du projet de loi de finances explique en effet que les efforts budgétaires déployés (en bleue la DIE, ou Dépense Interne d'Education), restent insuffisants par rapport aux hausses d'effectifs (courbe en vert). Il déplore « le manque d'anticipation de l'évolution des effectifs et donc des besoins (en termes de places, de taux d'encadrement, d'accompagnement, de locaux...) et, plus globalement, l'absence de stratégie sur l'avenir de l'enseignement supérieur. »

L'ouverture de huit nouveaux sites universitaires d'enseignement et de formation d'odontologie a été annoncée par le ministre de la Santé, Olivier Véran, et la ministre de l'Enseignement supérieur, Frédérique Vidal, pour la plupart à la rentrée de septembre 2022 [11]. Mais, bien qu'étant des signaux positifs pour la formation en santé, ces mesures ne semblent pas à ce jour consolidées sur le plan logistique, ni en terme de grément des personnels enseignants.

A la faculté d'odontologie de Lille, des optimisations ont été mises en œuvre au fil des années pour absorber l'accroissement des effectifs étudiants, avec une certaine efficacité. Citons entre autres exemples : le passage des travaux pratiques et travaux dirigés en sous-groupes (demi-promotions, voire quarts de promotions), la création de créneaux supplémentaires pour les entraînements sur simulateurs, l'affectation des externes par binômes en clinique. Cependant, de nouveaux leviers sont aujourd'hui nécessaires pour désaturer le système de formation par la simulation.

1.3 Contexte sanitaire : de nouvelles contraintes à intégrer

1.3.1 Contraintes d'ordre général

La pandémie, dite de la « COVID-19 », est une crise qui a d'ores et déjà forcé les pays du monde entier à opérer de profondes modifications à tout niveau dans leurs sociétés. Il est probable que nombre de ces modifications perdurent dans le temps et que d'autres actions complémentaires soient mises en place. Le virus à l'origine de cette maladie infectieuse est le SARS-CoV-2. Il s'exprime soit de façon asymptomatique, soit accompagné de signes allant de l'état pseudo-grippal à la pneumonie. Apparu en décembre 2019 dans la province de Wuhan, en Chine, ce virus a un taux de létalité variable (CFR), allant de moins de 0,1% à plus de 25% [12]. En matière de gestion épidémiologique, l'enjeu principal est de ne pas saturer les services de soins intensifs des hôpitaux, afin de ne pas alourdir le bilan des décès. Dès les premiers temps de la crise sanitaire, les hôpitaux et structures de soins dentaires se sont organisés pour faire face à la situation de façon réactive pour assurer la prise en charge des urgences, notamment en s'équipant d'EPI spécifiques et en reportant leurs plans de traitement en cours.

Les modes de propagation sont principalement le contact et les voies aériennes par aérosolisation, ce qui fait de l'odontologie une des professions les plus exposées. Aux Etats-Unis, le département en charge de la sécurité et de la santé au travail (Occupational Safety and Health Administration) a d'ailleurs classé les chirurgiens-dentistes et leurs équipes dans la catégorie professionnelle présentant le plus haut risque COVID-19. Cette classification a été faite sur la base des critères suivants: procédures produisant des aérosols, proximité physique avec les patients, et exposition directe à la cavité buccale [13].

La forte contagiosité de ce virus a conduit la France, comme la plupart des autres pays, à prendre un ensemble de mesures adaptatives et graduelles, comprenant à minima les « gestes barrières », telles que détaillées dans la figure ci-dessous, et pouvant aller jusqu'au couvre-feu voire au confinement total.



Figure 5 : Recommandations du Haut Conseil de la Santé Publique en date du 18 janvier 2021

A ces gestes barrières, selon la dynamique de l'épidémie et de ses vagues, on peut être amené à ajouter un ensemble de recommandations parmi lesquelles:

- L'isolement ou la quarantaine, selon le type d'exposition ou de contamination,
- Le pass sanitaire puis le pass vaccinal,
- Les jauges maximales pour les établissements recevant du public,
- L'obligation vaccinale pour certains professionnels, incluant les professionnels de santé,
- Le télétravail obligatoire pour les salariés lorsque c'est possible,
- Les tests PCR ou antigénique négatif pour certains déplacements notamment hors du territoire,

Ces mesures constituent de nouvelles contraintes à intégrer et demandent une adaptation pour chaque milieu socio-professionnel, et tout particulièrement en odontologie.

1.3.2 Contraintes spécifiques

Pour les chirurgiens-dentistes, en plus des mesures sanitaires habituelles liées aux soins, des protocoles supplémentaires ont dû être appliqués, tels que celui diffusé par l'ONCD en mars 2020 et détaillé dans la figure ci-après :

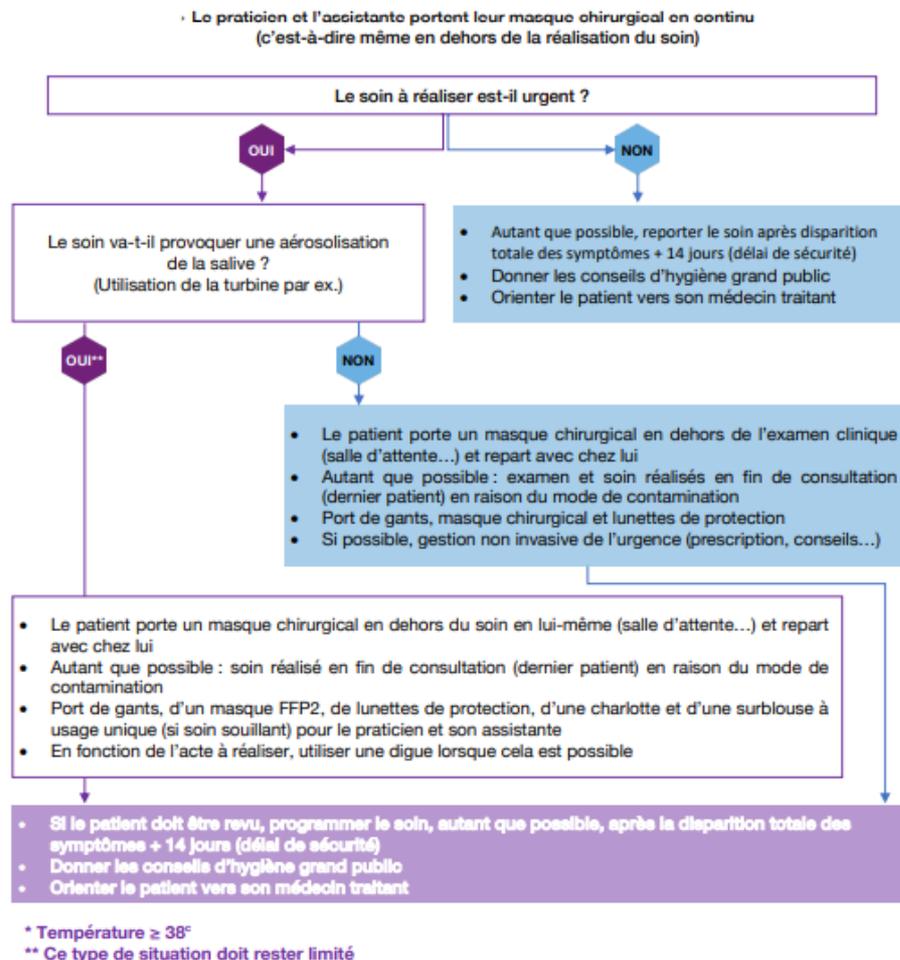


Figure 6 : Protocole Covid-19 pour les soins dentaires – source ONCD 13/03/2020.

Les précautions vis-à-vis des aérosolisations en particulier, aussi bien en terme de ventilation des locaux que de distanciation entre les personnes, ont entraîné la limitation voire la suspension des soins cliniques non urgents au CHRU de Lille. En effet la plupart des fauteuils dentaires y sont installés dans des espaces de type « open space », non isolés physiquement les uns des autres. Les mesures de distanciation et de jauges maximales pour les établissements recevant du public, ont ajouté également à la complexité de la situation, entraînant également une limitation des séances sur simulateurs.

Les EPI, eux aussi, sont un facteur limitant vis-à-vis de la bonne tenue des enseignements pratiques et cliniques (Tableau 1). Dans les premiers temps de la pandémie, l'approvisionnement en surblouses et en masques FFP2, voire même en gants, ont tout simplement été impossibles. Et une fois rétablis les réseaux d'approvisionnement, par la loi de l'offre et de la demande, ils ont assez logiquement représenté un surcoût significatif durant des mois, d'où un impact financier pour les universités. A ces conséquences s'ajoutent les impacts psychologiques et environnementaux difficilement quantifiables mais réels : impact psychologique pour les étudiants se retrouvant isolés socialement sur une longue période, et environnemental au regard des quantités d'EPI supplémentaires mis au rebut et non revalorisables.

Tableau 1 : EPI recommandés pour la prise en charge de patient suspect/confirmé COVID-19

Source : CPIAS, Version 28/04/2020.

Contexte d'entrée en chambre	Tablier plastique jetable	Surblouse à usage unique	Masque chirurgical	Masque FFP2	Lunettes/visière de protection	Gants à usage unique
Sans contact avec le patient <i>Précautions standard et gouttelettes</i>	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Avec contact mais SANS risque d'exposition aux liquides biologiques <i>Précautions standard, contact et gouttelettes</i>	✓	✗	✓	✗	✓ <i>Si signes resp. importants</i>	✗
Avec contact ET risque d'exposition aux liquides biologiques <i>Précautions standard, contact et gouttelettes</i>	✓	✗*	✓	✗	✓ <i>Si signes resp. importants ou risque projection</i>	✓
Procédures à risque d'aérosolisation, quelque soit le statut du patient *** <i>Précautions standard, contact + aérosolisation</i>	✗**	✓	✗	✓	✓	✓

* Surblouse à manche longue jetable pour toute exposition massive aux liquides biologiques ;

** Tablier plastique si surblouse non imperméable ;

*** Font partie de ces procédures les actes de chirurgie dentaire avec usage d'instruments rotatifs à haute vitesse.

Pour la formation des étudiants en chirurgie dentaire, les enjeux d'une bonne adaptation à ces nouvelles contraintes sont les suivants [13] :

- La protection de la santé des étudiants, des enseignants et du personnel,
- La continuité et la qualité de l'enseignement,
- La continuité et la qualité des évaluations pour la validation des semestres et l'obtention du diplôme,
- La confiance dans les mesures de santé et de sécurité,
- Le suivi des recommandations des instances compétentes,

Dans la continuité des actions déjà mises en œuvre de façon réactive durant la crise sanitaire, telles que les plateformes d'enseignement et d'évaluation en distanciel, la réorganisation des contenus théoriques et pratiques entre années scolaires, ou encore l'accompagnement psychologique des étudiants et enseignants, cette pandémie doit nous conduire à envisager de nouveaux outils et leviers pédagogiques pour garantir la continuité de soin et la continuité pédagogique en toute sécurité au sein de nos universités.

Le numérique est un type de support qu'il convient de considérer comme outil complémentaire voire alternatif aux supports pédagogiques conventionnels. En particulier les outils disponibles en distanciel constituent un élément de réponse potentiellement satisfaisante aux situations de fermetures universitaires soudaines et longues, telles que nous en avons connues lors de la pandémie de la COVID-19.

1.4 Contexte sociétal et juridique

1.4.1 Une volonté d'être plus aguerris pour les débuts en clinique et en cabinet

Une des spécificités majeures de l'odontologie est le caractère irréversible de la plupart des procédures opératoires [7].

Dans un passé encore récent, les approches cliniques étaient plus chirurgicales et invasives, notamment dans le traitement des lésions carieuses, traitement qui occupe une part importante et incontournable en omnipratique.

Aujourd'hui, la prévention et la conservation tissulaire occupent une place prioritaire dans nos thérapeutiques. Toutefois, malgré cette évolution dans le bon sens de nos pratiques et de nos procédures, la conservation tissulaire intégrale n'est pas encore possible dans bien des cas. De même, les techniques de régénération tissulaire ne permettent pas encore la restauration ad integrum des tissus durs ou mous, et sont par ailleurs coûteuses en matériel et nécessitent d'avoir reçu une formation complémentaire et spécifique.

Il en découle qu'au moment de réaliser leurs premiers gestes de soins sur des patients en clinique, les étudiants en chirurgie dentaire doivent posséder toutes les compétences nécessaires pour établir et mener un plan de traitement complet sans erreur de procédure, afin de n'occasionner aucun acte délétère ou iatrogène.

Or, autre spécificité en comparaison aux autres disciplines de santé, l'odontologie fait appel à un éventail très large de procédures nécessitant chacune des compétences psychomotrices spécifiques à une tâche : de l'anesthésie à la reconstitution prothétique, voire la rééducation fonctionnelle, en passant par la dentisterie restauratrice ou la chirurgie.

La maîtrise de tous ces sous-ensembles de compétences requière d'avoir été entraîné en phase préclinique à chaque geste de façon répétée.

Dans la pratique, malgré l'encadrement des praticiens et les entraînements suivis en amont, lors de leur arrivée en clinique, nombre d'externes estiment avoir un niveau de maîtrise inférieur à l'attendu. Cela génère de l'anxiété pour ces étudiants qui souhaiteraient donc être plus aguerris pour leurs débuts en clinique, et à plus forte raison en cabinet.

1.4.2 La recherche de davantage d'équité pour les évaluations pratiques

Les étudiants en odontologie de Lille ressentent depuis quelques années, pour une part d'entre eux, un manque d'équité dans les modes de validation de leurs semestres d'études. Il arrive alors que les évaluations des élèves fassent l'objet de litiges [7] pouvant aller jusqu'à des actions en justice de la part des étudiants concernés pour tenter d'invalider les évaluations.

Ces ressentis renvoient à plusieurs constats. Selon les disciplines et les thématiques, les exercices et évaluations pratiques sur simulateurs sont réalisés sur des dents en résine ou sur des dents naturelles. Or la collecte de dents naturelles demandées s'avère compliquée pour une partie des élèves. Les étudiants ayant des chirurgiens-dentistes parmi leurs proches seront avantagés, de même que ceux ayant de meilleurs moyens financiers seront plus à même de s'approvisionner en dents en résine

supplémentaires pour s'entraîner d'avantage, ce qui peut constituer de premières iniquités.

Pour les travaux pratiques et les évaluations, on tend depuis quelques années à généraliser le recours à des dents synthétiques de type Frasco® ou en impression 3D. Mais certains travaux sont encore réalisés et évalués avec les mêmes critères sur des dents naturelles possédant pourtant des anatomies et des niveaux de difficulté différents, ce qui engendre un biais dans le mode d'évaluation [5].

Pour la partie clinique, même hors situation extrême de COVID-19, où ils ont été dans l'impossibilité de prodiguer des soins en clinique durant des mois, les étudiants observent de grandes inégalités dans l'attribution de patients. La taille des promotions étant en constante augmentation, le nombre de patients reçus selon le dimensionnement des salles cliniques au CHU de Lille devient insuffisant. Dans un passé encore récent, courant des années 2000, les étudiants en odontologie soignaient seuls les patients, sous la responsabilité des praticiens hospitaliers. Depuis, compte tenu du nombre accru d'élèves pour un nombre sensiblement identique de fauteuils, ils ont été organisés en binômes de clinique, ce qui a eu pour conséquence de diminuer le nombre d'heures de pratique hospitalière sur des patients réels. Les praticiens hospitaliers étant eux-mêmes en nombre insuffisant au regard des promotions de 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} années, il devient rare de parvenir à faire coïncider les créneaux disponibles pour un binôme d'étudiants, avec ceux de leur patient et ceux d'un même praticien, le tout sur un nombre suffisant de rendez-vous pour mener à bien un plan de traitement. La faisabilité des objectifs cliniques a ainsi connu une nette dégradation.

On peut également imaginer la difficulté qu'ont les enseignants à avoir une vision détaillée de chacun de leurs étudiants pour apprécier au mieux l'état de leurs compétences et les accompagner dans leur progression.

Au-delà des divergences de points de vue, reste que les ressentis étudiants ont tendance à se tendre et sont de nature à dégrader d'une part l'image de nos établissements de santé, et d'autre part les relations entre étudiants et enseignants pourtant essentielles à la qualité de l'enseignement et des soins en clinique. Ainsi toute action en faveur d'une meilleure préparation préclinique des étudiants et d'une meilleure standardisation des évaluations ne pourront qu'être bénéfiques.

1.4.3 La judiciarisation de la société

Notre société a connu une évolution des mentalités au cours de ces dernières décennies et a vu grandir une nouvelle notion forte : « l'intolérance aux écarts ». Comme l'industrie du nucléaire ou l'aéronautique avant lui, le milieu de la santé, en tant que domaine d'activités dites « à risque », doit s'adapter à cette évolution [8]. La simulation au sens large s'impose aujourd'hui comme l'outil pédagogique nécessaire et obligatoire dans la formation des professionnels de santé, et ce à cause de la judiciarisation et de la médiatisation des complications médicales [5].

Pour les chirurgiens-dentistes exerçant aujourd'hui, il est devenu courant de faire l'objet d'un recours voire d'une poursuite en justice suite à un litige avec un patient [14]. Face à cette tendance sociétale, de plus en plus de

praticiens souscrivent à une garantie de protection juridique en plus de leur assurance de responsabilité civile professionnelle. Cette garantie vise à prendre en charge la gestion des éventuels litiges et, le cas échéant, des frais de procédure nécessaires à la protection de leurs droits. Dans la pratique, même dans les cas où le praticien considère ne pas être en faute, ces protections juridiques optent le plus souvent pour une issue amiable du litige, pour faire l'économie d'une procédure en justice longue et coûteuse. Ceci se fait au moyen du versement d'une somme d'argent en l'échange de quoi le patient s'engage à abandonner ses poursuites. En plus du discrédit que subit la profession avec ce type de logique, le travers de cette gestion est qu'il est de nature à encourager les actions en justice. Ces mauvaises statistiques entraînent à leur tour des augmentations des primes d'assurance, et cette spirale négative pèse sur les charges et la sérénité du praticien.

Un autre levier sur lequel agir est alors d'améliorer le niveau de la formation initiale et par la suite de la formation continue. Assez logiquement, les universités ont là un rôle central à jouer dans l'amélioration continue de la formation des chirurgiens-dentistes.

1.5 Contexte universitaire et industriel : la globalisation

Quelles que soient nos aspirations individuelles et locales, notre ère est celle de la globalisation. Les pays du monde entier sont interconnectés et interdépendants économiquement et industriellement. Les universités sont interdépendantes de l'économie et de l'industrie de leur pays, lui-même interconnecté aux autres pays.

En matière de relations entre les universités et l'industrie, l'OCDE recommande davantage d'intégration pour susciter et soutenir les collaborations. L'enseignement dentaire à l'échelle mondiale s'est déjà engagé dans cette voie pour mettre en commun des connaissances dans le secteur de l'innovation [7].

Le simulateur haptique dentaire Simodont[®] en est un bon exemple. Il est le fruit d'une collaboration entre la société de simulateurs de vol, MOOG[®], et l'université dentaire d'Amsterdam ACTA.

L'éducation en général, et l'enseignement supérieur en particulier, doivent évoluer en cohérence avec notre époque de développement technologique permanent : être partie prenante des initiatives de changement notamment avec plus de mobilité internationale de nos étudiants qui contribueront à notre rayonnement et rapporteront de bonnes pratiques nouvelles ; plus de collaborations transcontinentales ; une urbanisation croissante privilégiant les établissements du secteur tertiaire ; des exigences accrues en matière de normes éducatives par les parties prenantes, y compris les associations de parents.

En s'associant à ces démarches volontaristes de changement, le secteur de l'éducation a reconnu le besoin de devenir plus flexible et efficace. Et les technologies numériques, à commencer par la simulation RV, s'imposent aujourd'hui comme des vecteurs incontournables des performances attendues.

2 Apports du numérique par rapport aux outils pédagogiques conventionnels

2.1 Généralités

2.1.1 Définitions

Simulation :

La simulation en santé correspond à « l'utilisation d'un matériel (comme un mannequin ou un simulateur procédural), de la réalité virtuelle ou d'un patient standardisé, pour reproduire des situations ou des environnements de soins, 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 » [8].

Centre de simulation

Un centre de simulation désigne, de façon générique, « des structures institutionnelles qui regroupent un ensemble de ressources humaines, scientifiques et éducationnelles, immobilières, techniques et logistiques ayant vocation à être utilisées au service de l'enseignement et de l'apprentissage dans le cadre de dispositifs – ou programmes – de formation de professionnels de santé » [15].

Réalité Virtuelle (RV) :

La RV utilise la technologie informatique pour générer un environnement numérique similaire à l'environnement réel sur les plans visuel, auditif, tactile et autres. L'opérateur interagit avec cet environnement et ressent les retours des objets virtuels à l'aide d'équipements spécialisés. Un système RV complet se compose d'un dispositif d'affichage stéréo, d'un dispositif de suivi de mouvement, d'un dispositif d'entrée et d'une plateforme informatique [16]. Le dispositif d'affichage stéréo est généralement un visiocasque, comme par exemple l'Oculus® illustré dans la figure ci-dessous.



Figure 7 : Casque Oculus® et ses accessoires d'immersion virtuelle 3D.

Réalité Augmentée (RA) :

Ce type de réalité est un mélange de réalité virtuelle et de notre perception visuelle du monde réel [5]. Elle permet à l'utilisateur de superposer des

éléments virtuels en 3D au sein d'un champ de vision réel. Cette technologie s'est considérablement démocratisée depuis sa diffusion sur smartphone ou tablette, comme dans cet exemple sur la figure ci-dessous. Les applications de cette technologie sont quasi-infinies, et sont un vecteur de compréhension et d'apprentissage dans tous les domaines, y compris en chirurgie dentaire.



Figure 8 : Complete Anatomy® application d'anatomie en réalité augmentée avec ARKit®

Haptique :

Du grec ἅπτομαι (haptomai) qui signifie « *je touche* », cette technologie consiste en la perception et la transmission de signaux moteurs pour améliorer le niveau de réalisme d'une simulation en RV. Appliquée à l'odontologie, pour reproduire au mieux les perceptions tactiles et kinesthésiques au cours d'un entraînement, la force de réaction de l'objet virtuel est calculée à l'aide d'un algorithme de génération de force approprié, qui intervient au moment où la fraise entre en contact avec l'objet virtuel. L'algorithme s'adapte au type de scénario, selon qu'il s'agisse par exemple de préparation prothétique, de détartrage ou encore de forage osseux. Ainsi, l'émail, la dentine, le tissu carié ou pulpaire auront des retours de force différents. A titre d'exemple, la dentine nécessitera moins de pression sur le stylet que l'émail. Les sensations et le toucher sont alors plus proches de la réalité [16].

Serious Games :

Selon les définitions proposées par le CERIMES, les Serious Games, ou Jeux Sérieux, sont des programmes à l'intersection du jeu vidéo et de l'information :

- « *Véritable outil de formation, communication, simulation, [le jeu sérieux est] en quelque sorte une déclinaison utile du jeu vidéo au service des professionnels* » ;

- « *Les serious games (ou jeux sérieux) sont des applications développées à partir des technologies avancées du jeu vidéo, faisant appel aux mêmes approches de design et savoir-faire que le jeu classique (3D temps réel, simulation d'objets, d'individus, d'environnements...) mais qui dépassent la seule dimension du divertissement* » [17].

2.1.2 Les différents types de simulation en santé

Dans le cadre des études de santé, on distingue différentes techniques de simulation, catégorisées en plusieurs sous-ensembles, selon la nature de leur support pédagogique (Figure 9 ci-dessous). La simulation organique regroupe les simulations animales et humaines, chacune pouvant être pratiquée sur des sujets vivants ou non. La simulation dite non organique, fait appel quant à elle aux simulations synthétiques d'une part (mannequins et simulateurs procéduraux) et électroniques d'autre part (simulateur informatisé, et/ou de RV) [8].

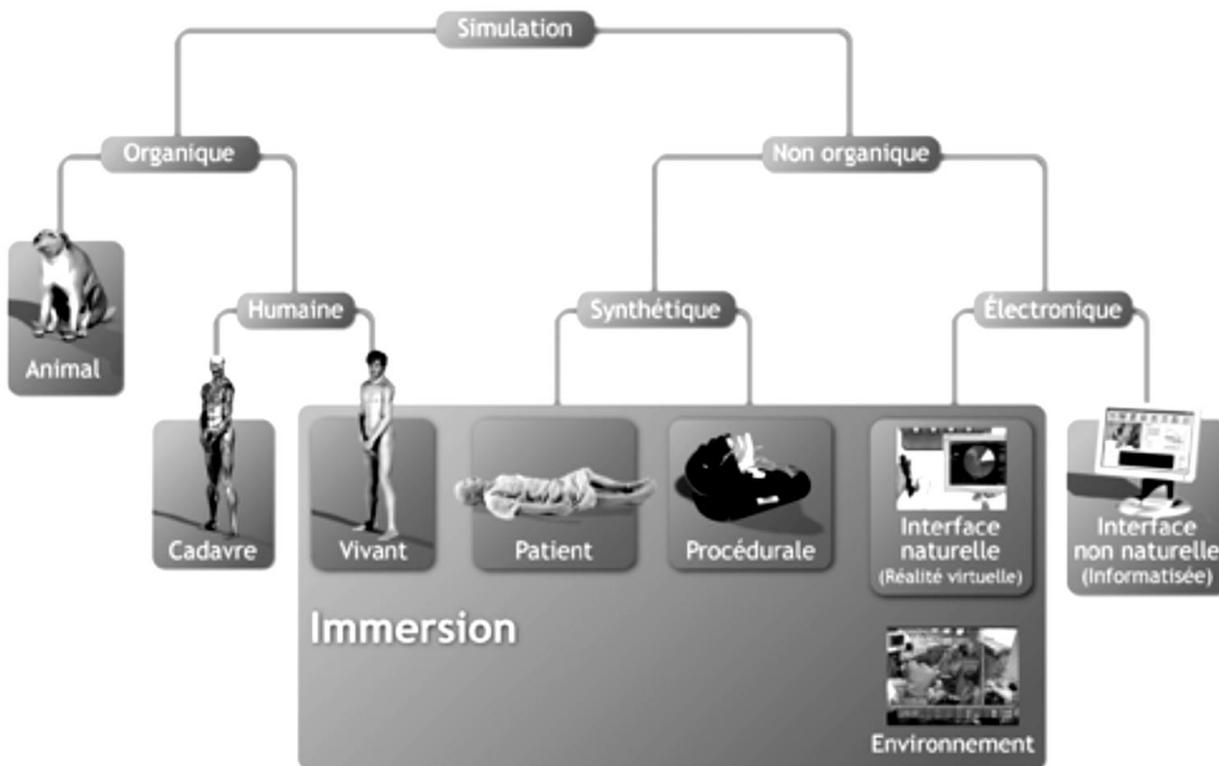


Figure 9 : Les différents types de simulation médicale [8]

Le tableau ci-après détaille plus précisément les différentes techniques selon le type de simulation concernée :

Tableau 2 : Description des différentes techniques de simulation, d'après [8]

Animale	Expérimentation animale	L' expérimentation animale permet un apprentissage de gestes chirurgicaux simples (sutures et levée de lambeaux sur mandibules de porc par ex.) ou plus complexes.
Humaine	L'utilisation de cadavre	L'utilisation de cadavre peut permettre un apprentissage de l'anatomie (études, dissection...) et de gestes techniques en chirurgie (anesthésies locorégionales, procédures chirurgicales, pose d'implants sur pièces anatomiques).
	« Patient standardisé »	Le « patient standardisé » est un patient « volontaire » ou un acteur sollicité sur la base d'un scénario préétabli et détaillé. Il permet de développer des compétences en matière de communication pour des informations à fort enjeu (annonce de mauvaise nouvelle par exemple) ou complexes (protocoles, rapport bénéfice/risque...).
	Le jeu de rôles	Le jeu de rôles est une technique pédagogique d'apprentissage des habiletés relationnelles. Il s'agit de simuler une situation vraisemblable et en partie imprévisible dans un environnement fictif spécifique. Les personnes y jouent un rôle déterminé, en improvisant le dialogue. Le jeu de rôles permet une mise en situation effective et nécessite une implication personnelle de chacun, en faisant appel au vécu personnel et professionnel. Il permet aussi l'analyse des comportements et le renvoi d'image aux intervenants.

Synthétique	Simulateurs patients (haute ou basse fidélité)	Les simulateurs patients sont des mannequins réalistes grandeur nature. Selon leur niveau de sophistication, ils peuvent être pilotés par ordinateur, simuler la respiration, l'élocution, et répondre à des stimuli (mannequins haute-fidélité). Les mannequins obéissent à un scénario préétabli. Le formateur peut faire varier les constantes vitales et l'état clinique. Contextualisées dans une salle d'opération ou de réanimation, les situations cliniques vécues le plus souvent en équipe sont extrêmement proches de la réalité.
	Simulateurs procéduraux (haute ou basse fidélité)	Les simulateurs procéduraux permettent un apprentissage par la répétition de gestes dans une procédure, le plus souvent technique, et cela sans risque pour le patient. Ce type de simulateur couvre un large éventail de procédures : tête d'intubation, arbre bronchique pour endoscopie, bras pour perfusion, gestes chirurgicaux usuels. Les simulateurs chirurgicaux, dans leur forme la plus simple, sont constitués par exemple d'une boîte cachant la vision directe (<i>pelvic trainer</i>), intégrant ou non une caméra, et permettant de réaliser des exercices variés (préhension, suture, dissection). Certains simulateurs plus sophistiqués permettent de reproduire des situations interventionnelles de haute technicité comme par exemple des simulateurs de coronarographie, d'interventions complètes en coeliochirurgie, d'endoscopie digestive, d'angiographie, etc. Ils utilisent des logiciels très performants.
Électronique	Réalité virtuelle et/ou Réalité augmentée	La réalité virtuelle est une technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel en temps réel le comportement d'entités 3D en interaction entre elles, et avec l'utilisateur en immersion pseudonaturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. Elle permet d'appréhender des situations complexes, ou d'étudier des concepts de manière plus concrète par des modèles informatiques. Ces applications sont interactives et permettent par exemple de comprendre comment un équipement peut être utilisé, de s'entraîner à prendre des décisions cliniques pour un patient virtuel en fonction de l'ajustement de différentes variables, mais uniquement par l'intermédiaire de l'écran de l'ordinateur. La réalité augmentée désigne les systèmes informatiques qui rendent possible la superposition d'un modèle virtuel 3D ou 2D à la perception qu'un individu a naturellement de la réalité et cela en temps réel. Elle désigne les différentes méthodes qui permettent d'incruster de façon réaliste des objets virtuels dans une séquence d'images. Elle s'applique aussi bien à la perception visuelle (superposition d'image virtuelle aux images réelles) qu'aux perceptions proprioceptives comme les perceptions tactiles ou auditives.
	Environnement 3D et jeux sérieux	L' environnement 3D se rapproche par son réalisme des environnements de jeux vidéo les plus performants. Le coût de création des environnements réalistes virtuels est très élevé. Ces techniques ne présentent pas en théorie de limite dans la diversité des situations qu'il est possible de créer, et permettent une immersion totale dans la situation mise en scène. Les jeux sérieux (de l'anglais <i>serious games</i>) sont des applications développées à partir des technologies avancées du jeu vidéo (3D temps réel, simulation d'objets, d'individus, d'environnements...). Ils combinent une intention sérieuse, de type pédagogique, informative, communicationnelle, ou d'entraînement avec des ressorts ludiques. Ils sont en quelque sorte une déclinaison utile du jeu vidéo au service des professionnels.
Mixte	Simulation hybride	La simulation hybride est l'association de plusieurs techniques de simulation. Par exemple, la combinaison d'un patient standardisé et d'une partie de mannequin (bassin d'accouchement pour l'apprentissage de gestes obstétricaux, « peau simulée » pour sutures, etc.) contextualisée dans un environnement adéquat apporte du réalisme aux scénarios en ajoutant les réactions du patient ; dans ce cas, cette technique est qualifiée de haute-fidélité.

Les niveaux d'immersivité :

Les systèmes de RV sont divisés en trois niveaux immersifs basés sur le degré de sens et d'interactions stimulés [16] : système non immersif, système semi-immersif et système immersif. Un système non immersif ne reproduit les images que sur écran d'ordinateur. Un système immersif place l'utilisateur dans un environnement virtuel complet avec la prise en

charge de plusieurs dispositifs sensoriels, notamment visuels, auditifs et haptiques. Enfin, un système semi-immersif reproduit un environnement simulé à mi-chemin entre les deux.

2.1.3 Histoire de la simulation dentaire

La formation par la simulation est très présente dans la plupart des industries à risques, telles que l'industrie nucléaire et l'aéronautique, que l'on considère aujourd'hui comme activités ultra sûres. Cet essor tire son origine de deux motivations: la première est la conviction profonde que la simulation peut améliorer le niveau de sécurité. La deuxième est l'enjeu économique. En effet, outre le risque de tuer le pilote ou de crasher l'avion sur une zone habitée, l'industrie aéronautique a compris qu'il était moins coûteux d'entraîner ses pilotes sur des matériels à terre que de faire voler un avion de ligne à vide. Dans l'industrie nucléaire, des gains financiers substantiels ont été mesurés en France par une diminution de 20% de la fréquence des arrêts automatiques de réacteurs, sachant qu'un jour d'arrêt de réacteur représente un coût de 1 million d'euros.

Dans un premier temps la formation par la simulation a été utilisée en formation initiale au moyen de dispositifs technologiques: simulateurs, mannequins, etc. Elle a ensuite rapidement été axée sur des exercices comportementaux puis sur la validation des compétences des professionnels. Les facteurs humains, intervenant principalement dans les activités en équipes, ont été progressivement intégrés aux simulations, après que leur rôle prépondérant dans la sécurité ait été démontré. Des investissements importants ont été faits dans ces domaines pour la conception et le déploiement de simulateurs « pleine échelle », reproduisant très fidèlement l'environnement de travail, ainsi que pour le grèvement des ressources humaines nécessaires à ces formations. Au sein d'Electricité de France, depuis 2015, l'ensemble des centres de formation sont dotés de simulateurs pleine échelle numériques haptiques, en plus des simulateurs physiques historiques en place depuis la construction du parc nucléaire français au lendemain de la seconde guerre mondiale. Ces moyens mis en œuvre reflètent une véritable politique institutionnelle basée sur des motivations sécuritaires (les accidents étant devenus inacceptables pour l'opinion publique) et économiques. Des limites sont cependant reconnues par la plupart des professionnels, en particulier le fait que l'apprentissage ne peut être réalisé en totalité sur simulateurs et que la pratique en conditions réelles reste nécessaire [8].

Dans le domaine dentaire, la première école à proprement parler de chirurgie dentaire a été fondée en 1840 à Baltimore, Ohio, États-Unis [7]. Elle a inspiré la création d'autres écoles dentaires dans le monde. Les méthodes pédagogiques de l'époque reposaient sur des travaux pratiques de simulation sur paillasse avec des dents humaines naturelles extraites. Mais au milieu du XIX^{ème} siècle, l'approvisionnement en dents humaines à but pédagogique constituait une réelle difficulté, en raison principalement de la forte demande pour leur utilisation en prothèses dentaires, car le rendu esthétique était bien meilleur qu'avec l'ivoire utilisée jusque-là.

En 1894, Oswald Fergus crée le premier simulateur à tête fantôme avec la volonté de gagner en réalisme. Il consiste en deux mâchoires de laiton

assemblées et articulées entre elles par une tige métallique réglable, comme sur la Figure 10 ci-dessous.

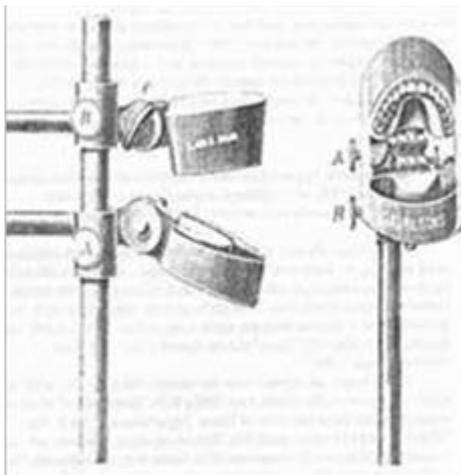


Figure 10 : Un croquis de la première tête fantôme conçue par Oswald Fergus en 1894.

Puis, avec le développement de l'enseignement dentaire et la raréfaction des dents naturelles disponibles, l'usage de dents « à base de résine » s'est généralisé à la fin du XX^{ème} siècle.

Les entraînements sur paillasses, combinés aux simulateurs à tête fantôme, semblent avoir été la norme depuis le début du XX^{ème} siècle pour l'acquisition de compétences en chirurgie dentaire, et restent le principal modèle pédagogique utilisé de nos jours.

Le simulateur de type « tête fantôme » est l'outil de simulation emblématique et central dans l'enseignement dentaire. Ses avantages sont nombreux : simplicité, robustesse, ergonomie. Il est utilisable pour l'acquisition des principales compétences élémentaires et fondamentales, telles que la posture, la manipulation correcte du miroir et de la pièce à main, ou encore l'utilisation conforme de points d'appui.

Les versions modernes des simulateurs de type fantômes (Figure 11) ont vu leur niveau de réalisme amélioré. Ils disposent entre autres d'une seringue multifonction air/eau, de joues en matériau élastomère, et d'une aspiration. Ils permettent le montage sur arcades de dents naturelles ou synthétiques.



Figure 11 : Un simulateur à tête fantôme moderne.

On assiste depuis quelques années à l'émergence de nouvelles dents synthétiques visant à reproduire fidèlement les différences de densité et de textures des tissus constitutifs de l'organe dentaire [18,19]. L'objectif étant aussi de pallier aux inconvénients des dents naturelles vis-à-vis des questions sanitaire, déontologique, et d'objectivité des évaluations. Ces dents synthétiques en impression 3D méritent toutefois d'être encore perfectionnées [20]. Elles peuvent présenter certaines variations dimensionnelles, notamment au niveau de la perméabilité des canaux. Leur coût peut par ailleurs être un frein en comparaison aux dents naturelles récupérées.

Les simulateurs assistés par ordinateur en Réalité Virtuelle (ou CVRS)

Ils ont fait leur entrée dans l'enseignement dentaire d'Amérique du Nord et d'Europe au début des années 2000, voire à la fin des années 90 [10], et ont ainsi ouvert une nouvelle voie dans l'acquisition des compétences psychomotrices fines en dentisterie. Cette technologie comporte des bibliothèques de dents virtuelles générées par ordinateur, et des dispositifs physiques simulant le contrôle des instruments statiques et rotatifs sur un patient. Selon le modèle, il peut s'agir par exemple de joysticks ou de stylos.

Leur plus-value est de combiner les avantages de la manipulation sur mannequin physique et ceux de la réalité virtuelle. Ils permettent en effet la visualisation sur écran 3D des gestes réalisés, avec un retour en temps réel et une évaluation par rapport aux standards.

Font partie de ce type de simulateurs, par exemple, DentSim™ et Image Guided Implantology (IGI®).

Les simulateurs de RV améliorée par l'haptique

Développée dès la fin des années 70 dans le milieu de l'aéronautique, et plus particulièrement des simulateurs de vol, cette technologie a pour objectif d'améliorer le niveau de réalisme perçu par l'utilisateur. Il consiste à exercer un retour sensoriel, dit haptique, en réaction aux gestes exécutés sur le dispositif d'interface physique. Le domaine de la formation professionnelle en chirurgie est un contributeur de premier plan pour le développement de la technologie haptique afin de reproduire avec précision les conditions cliniques.

La médecine bucco-dentaire fait appel à des gestes d'une sensorialité éminemment fine et précise, avec une variabilité significative des retours tactiles perçus selon les substances traitées: émail, dentine, parenchyme pulpaire, tissus de soutien de la dent... En s'appuyant sur les technologies aéronautiques et les travaux dans le domaine de la médecine chirurgicale, des prototypes de simulateurs haptiques dentaires ont été développés. Les premiers simulateurs haptiques dentaire apparaissent dans les unités de formation dentaire au début des années 2000. Ils combinent un dispositif haptique et des modèles virtuels de dents ou de cavité buccale humaine comme support de mise en œuvre des procédures. Quelques exemples de simulateurs virtuels haptiques : Virtual Reality Dental Training System (VRDTS), VirtEasy®, Simodont®, VoxelMan®.

Les dernières avancées

De nos jours, le nombre de simulateurs de réalité virtuelle déployés dans le monde est croissant. Dans toutes les spécialités dentaires, les logiciels de simulation occupent une part grandissante dans la planification chirurgicale, notamment en chirurgie orthognathique, en implantologie ainsi que pour le diagnostic et les traitements de maladies parodontales. Dans l'enseignement dentaire, on trouve également des outils numériques de simulation, par exemple pour les actes de chirurgie orale et implantaire. Au Japon, des premiers patients robotisés capables de déplacements autonomes, de salivation et d'échanges verbaux sommaires ont été récemment mis au point. En outre, des interfaces numériques existent pour recréer une unité de formation dentaire totalement virtuelle et immersive avec un environnement d'apprentissage favorable et disponible à distance.

2.2 Inconvénients du numérique dans le cadre de la formation en santé

Les innovations technologiques liées au numérique sont le plus souvent perçues de façon positive et avantageuse. Dans le domaine de la formation en chirurgie dentaire, ces technologies peuvent toutefois présenter certaines limites, que nous allons aborder ici.

2.2.1 Le retour d'expérience des simulateurs numériques Lillois

L'installation de trois simulateurs VirtEasy®, de technologie numérique et haptique, à la faculté de chirurgie dentaire de Lille a fait l'objet d'un retour d'expérience en 2018. Cette étude fait état de plusieurs points négatifs [5] :

- **Des reports dans la date de mise en service** des simulateurs à plusieurs reprises, principalement liés à des étapes de paramétrages préalables. Une collaboration étroite a été nécessaire entre l'équipe pédagogique de la faculté et l'entreprise HRV (Haptique Réalité Virtuelle), conceptrice de ce simulateur, dans le but d'obtenir la meilleure expérience de simulation possible. L'élément le plus complexe a été la calibration du bras haptique pour reproduire le plus fidèlement possible les variations de densités des différents tissus dentaires virtuels modélisés. Le rendu tactile obtenu est plutôt réaliste, mais aura été chronophage.

Il s'est avéré également nécessaire de procéder à certains remodelages dans les scénarii de prothèse : les fraises et leurs vitesses de rotation, ont par exemple été retravaillées pour correspondre aux trousseaux utilisés cliniquement à Lille.

- **Des bugs** ayant nécessité des correctifs: lors des exercices de préparation périphérique coronaire, après passage d'un point de contact, des débris fantômes restaient en suspens plutôt que d'être éliminés. Par ailleurs, dans les premiers temps de la mise en service, la procédure de réduction occlusale n'était pas possible.

- **Des difficultés dans les mises à jour.** Comme pour tout outil informatique, des mises à jour du logiciel sont régulièrement nécessaires pour améliorer ou maintenir ses performances. Or, dans ce cas, des défaillances au niveau de certaines de ces mises à jour ont été

constatées. Ces défaillances, imputables au fournisseur, ont été particulièrement chronophages pour le personnel en charge de l'exploitation de ces matériels au sein de la faculté.

2.2.2 Un niveau de réalisme perfectible selon les modèles

Vision stéréoscopique et résolution graphique :

Les affichages 3D dans les simulateurs dentaires sont relativement en retard [7]. Pour obtenir un affichage 3D, la plupart des simulateurs utilisent des lunettes 3D ; ceux-ci peuvent modifier légèrement la couleur des tissus buccaux et peuvent produire des effets indésirables chez certaines personnes telles que des vertiges et des nausées [21]. Le filtre des lunettes 3D peut également altérer la qualité de l'image dans une certaine mesure, et diminuer sa résolution. Or l'affichage des tissus de l'organe dentaire doit être précis pour distinguer leurs nuances de texture et de densité. La qualité de l'affichage peut également affecter l'expérience immersive 3D. Les recherches et développements doivent donc améliorer encore ces caractéristiques d'affichage 3D pour remplacer les lunettes 3D [16].

Le retour de force :

Comme pour la qualité graphique, la fidélité du retour de force des simulateurs numériques est essentielle pour percevoir précisément les nuances tactiles des différents tissus. La modélisation et la génération des retours d'effort haptiques des simulateurs repose sur un algorithme. Celui-ci vise à reproduire les retours de force d'un instrument réel en contact avec les tissus bucco-dentaires, mais sans y parvenir parfaitement, en particulier s'agissant des tissus mous. Ceci constitue donc un autre axe de recherche pour parfaire le réalisme tactile [7,22].

La simulation des tissus mous :

Lorsqu'un instrument simulé entre en contact avec un corps virtuel déformable (langue, les joues, les lèvres...), celui-ci doit visuellement se déformer en conséquence [23], selon ses propriétés physiques propres de densité et d'élasticité. Pour mimer ces propriétés, on emploie un modèle physique, qui repose généralement sur le principe de masse-ressort ou celui des éléments finis [24]. Le premier modèle est le plus répandu, car plus simple, mais peine à estimer finement les volumes de tissus et leurs raideurs. Le second est plus performant mais difficilement exploitable en simulation temps réel compte tenu des capacités de calcul nécessaires [7]. Les modèles physiques employés et les performances de calcul méritent donc à être améliorés pour tendre vers un excellent niveau de réalisme des tissus mous en simulation 3D.

Posture et ergonomie :

Certains systèmes nécessitent une action sur des joysticks pour modifier par exemple les angles de vue du site opératoire en 3D, ce qui peut priver l'apprentissage d'une partie des habiletés psychomotrices nécessaires, telles que le bon maniement d'un miroir en bouche. De même, certains systèmes ne disposent pas de repose-doigt fixe ou encore de pédales, ce qui rend discutable la transférabilité clinique des compétences acquises en simulation numérique [7].

Notons toutefois qu'il est difficile de faire une généralité de ces observations, tant les modèles de simulateurs numériques sont nombreux et différent dans leurs équipements et configurations. Par ailleurs les études trouvées et citées ci-dessus à propos du niveau de réalisme datent pour la plupart de la première moitié des années 2010, si bien que des études complémentaires sur les performances graphiques actuelles seraient nécessaires, compte tenu de la dynamique des avancées technologiques dans ce domaine.

2.2.3 Les difficultés de financement

En France et en Europe, l'origine des financements de départ pour des projets de formation par la simulation semble relever essentiellement des universités et de fonds publics régionaux et parfois également de fonds privés, comme le montre le tableau ci-après.

Tableau 3 : Répartition moyenne des sources de financement d'après une étude HAS [15]

	Montants (en euros)
Actionnaire	100
Association	100
Autres	2 400
Pompiers	10 000
ARH	20 000
Banque assurance	40 000
Conseil régional	40 000
Centre hospitalier	100 000
Faculté de médecine	200 000
Université	32 000
Conseil général	540 000
United States Surgical Corporation	1 500 000

Ces données étant souvent confidentielles, voire sensibles, et les modes de calcul étant différents d'un centre à l'autre (notamment en terme de charges de personnels), il est difficile d'obtenir une vision précise et représentative de ce qui se fait en terme de financement pour ce type de projets.

Toutefois, un constat ressort assez nettement : les centres de formation font état de difficultés, voire de grandes difficultés, concernant le financement de leurs projets de formation par la simulation. Plus de la moitié d'entre eux démarrent avec un financement initial de moins de 100 000 euros, et déclarent être en déficit de financement annuel [8].

A titre de comparaison, un simulateur virtuel amélioré par l'haptique, comme le VirtEasy® par exemple, coûte environ 65 000€ HT, contre environ 16 500€ HT pour un simulateur à tête fantôme. Ce coût peut dépasser 80 000€ HT pour l'acquisition d'un modèle hybride alliant les avantages des deux technologies (unité physique complète avec mannequin + virtualisation 3D sur écrans et feedback temps réel). L'investissement initial n'est donc pas à négliger, mais il faut considérer la rentabilité et l'efficacité globale sur le long terme [5].

2.2.4 Un entraînement préclinique incomplet

Malgré les progrès rapides et permanents de ces technologies numériques, les procédures et exercices disponibles à ce jour ne sont pas intégralement poussés jusqu'à leur finalité clinique, pourtant primordiale pour un apprentissage de qualité.

L'enchaînement et la répétition de l'intégralité des protocoles opératoires d'un plan de traitement global cohérent constituent, pour l'apprenant, les conditions essentielles à l'acquisition des compétences psychomotrices nécessaires. Cela conditionne également la bonne mémorisation des gestes et des procédures à maîtriser [5].

Or les modules de simulation virtuelle haptique actuels, même les plus aboutis, n'intègrent pas, à notre connaissance, la totalité des gestes couramment mis en œuvre en odontologie. Ainsi, pour certaines procédures telles que celles listées ci-dessous, la formation par la simulation devra passer par une technique physique conventionnelle.

⇒ En dentisterie restauratrice :

- la pose du champ opératoire ;
- la pose des différentes matrices ;
- la stratification d'un composite ;
- les finitions et contrôles postopératoires (polissage, réglage occlusal, contrôle des points de contact...)

⇒ En endodontie :

- le cathétérisme manuel ;
- l'irrigation ;
- les différentes techniques d'obturation canalaire ;

⇒ En prothèse fixée :

- la réalisation d'un isomoulage avant préparation ;
- la réalisation de reconstitutions provisoires ;
- le rebasage et l'ajustage d'une provisoire ;
- les techniques d'empreinte spécifiques : double mélange, wash technique ;
- le contrôle et la pose de prothèses unitaires ou plurales ;

⇒ En prothèse amovible :

- la réalisation d'empreintes secondaires ;
- l'enregistrement de la relation inter-maxillaire ;
- l'essayage d'une armature, d'un modèle en cire ;

⇒ En odontologie pédiatrique :

- le coiffage pulpaire direct ou indirect ;
- l'apexogénèse ;
- la pose de coiffes pédodontiques préformées ;
- les techniques spécifiques, telle la technique de Hall.

2.2.5 Une supervision informatisée potentiellement excessive

Au cours de la formation préclinique conventionnelle sur simulateurs physiques, les instructeurs apportent aux étudiants un retour d'information à la fin de la procédure ou à la fin de la tâche selon des points d'arrêt convenus (Ces retours sont aussi appelés rétroactions, ou parfois supervisions, ou encore feedbacks en Anglais). Le ratio instructeurs/étudiants ne permet généralement pas à chaque étudiant de recevoir des retours et des instructions tout au long de la procédure, contrairement à ce que proposent maintenant bon nombre de simulateurs VR.

Or, il a été suggéré que les retours informatiques très détaillés peuvent être démotivants, donc contre-productifs, en particulier pour les étudiants peu expérimentés [10]. La rétroaction continue (100 % pendant la tâche) ne présenterait pas d'avantage significatif par rapport à la rétroaction intermittente (66% du temps). Selon certaines études la rétroaction terminale apparaît même plus efficace que la rétroaction simultanée, du point de vue de la rétention des compétences des débutants. L'hypothèse est qu'une rétroaction constante et simultanée pourrait conduire à une confiance excessive dans cette rétroaction, au point de diminuer l'efficacité de l'apprentissage en l'absence de rétroaction. Une fréquence d'instruction réduite peut donc améliorer l'apprentissage des habiletés motrices et la détection des erreurs. Selon la théorie de la charge cognitive, il est plausible que la rétroaction continue puisse surcharger cognitivement l'apprenant et altérer les mécanismes de son apprentissage.

Sachant cela, il conviendra alors de paramétrer avec soin le niveau de rétroaction de la machine, et de l'adapter au besoin aux groupes d'utilisateurs, par exemple selon leur niveau de compétences. Les modèles aboutis de simulateurs numériques VR permettent en effet de configurer la part de rétroactions faites à l'étudiant.

2.2.6 La question de l'auto-évaluation

D'après certaines études, les étudiants ayant suivi un cursus de formation en RV sont plus aptes à s'auto-évaluer. La possibilité de s'auto-évaluer en temps réel est un des critères qui font des simulateurs virtuels un outil si précieux aux yeux des universités [7], aussi bien pour les encadrants que pour les apprenants.

Mais les bénéfices de l'auto-évaluation dépendent de plusieurs facteurs. Le niveau de rétroaction virtuelle devra notamment être paramétré avec soin, pour apporter la juste information sans devenir perturbant pour l'apprentissage.

Autre élément essentiel, l'esprit critique de l'apprenant vis-à-vis des retours faits par la machine, auxquels il ne doit pas accorder de confiance exagérée ou exclusive. A défaut, le risque est de dénaturer la réflexion clinique et d'induire un décalage contreproductif entre performances auto-évaluées et performances réelles évaluées par l'enseignant.

2.3 Avantages du numérique dans le cadre de la formation en santé

2.3.1 Un apprentissage préclinique sécurisé

En comparaison aux sessions de simulation sur têtes fantômes, le recours aux simulateurs virtuels apporte avant tout une sécurisation à tous les niveaux :

⇒ Au niveau physique :

Les instruments et notamment les rotatifs électriques et pneumatiques étant dématérialisés, il n'y a aucun risque de blessure ni même de contact avec des instruments coupants ou tranchants, telles que des fraises ou des forets [5].

Sur le plan postural, des études ont même mis en évidence une vraie plus-value de la formation en VR avec laquelle les étudiants avaient une posture correcte des membres supérieurs et du corps [25], ce qui est impératif dans la prévention des pathologies articulaires et osseuses des chirurgiens-dentistes.

⇒ Au niveau sanitaire :

Les travaux pratiques d'endodontie et de dentisterie restauratrice sur dents naturelles posent des problèmes d'ordre sanitaire, du fait de la présence potentielle d'agents pathogènes et de l'efficacité discutable de la désinfection à l'hypochlorite de sodium dilué à 50% [26].

Les simulateurs virtuels étant dépourvus de circuits d'eau et d'aspiration, ils éliminent les risques d'exposition à certains pathogènes tels que les Légionnelles [7].

Notons également qu'à plus forte raison les outils pédagogiques numériques utilisables en distanciel, tels que nous les décrirons plus loin, répondent parfaitement aux exigences de distanciation en situation de crise sanitaire.

⇒ Au niveau psychologique :

Comme l'explique la HAS dans son guide des bonnes pratiques pour la simulation en Santé, la possibilité d'un apprentissage par l'erreur hors du regard de ses pairs est une configuration vertueuse. Les feedbacks virtuels sur écran individuel lors des erreurs de procédures, plutôt que des commentaires à voix haute d'un enseignant, prémunissent les apprenants d'expériences désagréables et potentiellement démotivantes. L'étudiant peut alors se concentrer sur son autoanalyse et sur l'identification de ses axes de progrès [8].

2.3.2 Un apprentissage plus efficient

La qualité de l'apprentissage relève de différentes notions dont les trois principales sont : la motivation, le retour d'information et la répétition des gestes.

En odontologie, comme dans tous les métiers manuels, la maîtrise du geste s'acquiert avec la répétition de celui-ci. La progression et la motivation sont obtenues lorsqu'une part de succès est rendue possible

dans le cadre d'une procédure et que ce succès est formalisé par un retour d'information [5].

Par analogie, l'apprentissage par la simulation virtuelle est pleinement en accord avec ces trois notions :

- la répétition des différents exercices peut se faire indéfiniment, théoriquement sans limitation financière ou logistique ;
- la motivation de l'apprenant est stimulée par la gradation du niveau de difficulté des exercices : le succès à un exercice d'un niveau de difficulté donné encourage le passage à un niveau supérieur, et ainsi de suite ;
- le retour d'information prend la forme de l'évaluation informatisée et factuelle du simulateur, qui apporte à l'apprenant la visibilité nécessaire sur l'état de sa progression, et ce en temps réel ou en fin de session.

Les études concluent assez unanimement à l'importance de la simulation VR par rapport à la simulation physique traditionnelle pour l'acquisition de la motricité fine [10,27,28]. Mêmes observations pour l'haptique qui favoriserait la rapidité et la précision des gestes dans le développement des habiletés psychomotrices [7]. La raison la plus probable de cet effet positif semble être la possibilité de pratiquer un plus grand nombre de préparations en réalité virtuelle au cours d'une même séance pratique qu'avec des mannequins, ce qui est cohérent avec les notions d'apprentissage évoquées plus haut.

Une étude de l'Université de Pennsylvanie a quantifié ce gain en efficacité. Selon elle, les étudiants formés sur CVRS ont préparé significativement plus de dents par heure (3,8 contre 1,6) pour une moyenne de 11,71 dents préparées (contre 6,57) sur une même séance [10]. Cela suggère un programme de formation par la simulation virtuelle potentiellement plus rentable, et sans impact sur la qualité des travaux.

En effet, en terme de qualité des préparations dentaires, la plupart des études n'ont trouvé aucune différence significative entre les deux types de simulation. Certaines avancent même que les étudiants formés sur CVRS effectuaient des préparations de meilleure qualité. De même, plusieurs études n'ont trouvé aucune différence significative dans les notes finales aux examens pratiques. D'autres résultats suggèrent au contraire que l'introduction du CVRS dans la formation dentaire préclinique réduirait de plus de 50% les taux de rattrapages et les taux d'échec.

2.3.3 Un apprentissage moins sollicitant pour les enseignants

L'apprenant a besoin de retours systématiques sur son travail pour progresser. Généralement, l'instructeur les lui apporte en fin de procédure, du fait des contraintes temporelles et du ratio élèves/encadrants. Dans le cadre d'une formation sur simulateurs numériques, Buchanan [29] avance que les étudiants apprennent plus rapidement, effectuent plus de procédures par unité de temps, et atteignent au final les mêmes niveaux de compétence que leurs camarades formés classiquement, car ils sollicitent davantage les évaluations informatisées et moins les interactions avec l'instructeur. Le temps du corps professoral alloué à l'enseignement et la supervision s'en trouve ainsi réduit [10]. Dès 2004, une étude des Universités Case Western Reserve et de Columbia aux Etats-Unis [30], faisant les mêmes constats, ont apporté des précisions chiffrées. D'après eux, les encadrants ont consacré 5 fois plus de temps pour les étudiants formés classiquement

que pour ceux formés sur simulateurs VR, sans qu'il n'y ait, in fine, de différence statistique dans la qualité des préparations.

Cette diminution du temps consacré à l'enseignement pourrait influencer favorablement sur les capacités formatives dans les universités. Ce temps enseignant ainsi dégagé pourrait par exemple être utilisé pour approfondir des champs de compétences essentiels non procéduraux, tels que la gestion globale des patients, l'éthique et le travail d'équipe. L'expertise et l'expérience du professeur seraient mis à profit dans l'accompagnement de l'étudiant depuis le niveau de novice jusqu'à celui de clinicien. Le corps enseignant pourrait être plus à même de jauger la progression de chaque élève dans sa globalité plutôt qu'au travers d'évaluations ponctuelles et distantes [31].

Dans un contexte de montée en charge des contenus et volumes d'enseignement dentaire, l'utilisation efficace des temps de formation est devenue une nécessité prégnante [10].

2.3.4 Un apprentissage par l'erreur, standardisé et objectif

Avec l'introduction de la simulation assistée par ordinateur, les étudiants en odontologie ont été, pour la première fois, en capacité de procéder à la même procédure de façon répétée sans besoin impératif de supervision humaine impérative. Pour un développement efficace des habiletés psychomotrices, la compréhension des circonstances d'une erreur commise prévaut sur le résultat final lui-même [32]. La rétroaction augmentée peut ainsi favoriser le développement de la coordination œil-main et réduire le nombre d'erreurs de procédure [10]. Elle consiste à confronter les étudiants à leurs propres erreurs en temps réel au moyen de repères visuels pour comparer leur travail à un modèle idéal. L'enregistrement en temps réel des travaux permet également aux étudiants et aux enseignants d'analyser les erreurs au moment précis de leur occurrence, tout en bénéficiant de retours détaillés.

Les divergences de renvois d'image liées à la part de subjectivité des instructeurs sont une difficulté couramment remontée par les étudiants en dentaire [33]. Les retours objectifs et standardisés générés par ordinateur sont à considérer comme une aide qualitative pour progresser sur cette question.

Ceci fait écho à la culture positive de l'erreur, telle que recommandée dans le guide méthodologique de gestion des risques de la HAS [34]. Dans ce modèle, l'erreur est encouragée en tant que source d'apprentissage, dédramatisée et managée afin d'y faire face de manière pertinente. Il est suggéré aux apprenants de générer intentionnellement des erreurs et d'observer leur gestion a posteriori : gestion des émotions face à l'erreur, perturbation de l'efficacité, soutien et solidarité des membres de l'équipe, efficacité de l'identification et de la récupération de l'erreur. Correctement mis en œuvre, et grâce aux similitudes graphiques des simulations RV avec certains jeux vidéo, cela peut même revêtir une part de ludicité, favorable à une meilleure implication des élèves.

La simulation en réalité virtuelle présente également l'intérêt de proposer des exercices identiques, répétables, reproductibles et impartiaux pour tout un même groupe d'utilisateurs. Ces caractéristiques se prêtent à d'éventuels objectifs de normalisation de scénarii d'examen ainsi que de leur notation [7,35].

Notons toutefois que l'utilisation de la simulation VR dans l'octroi de licences et des examens a été envisagée dans les formations de santé aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Asie, sans être semble-t-il retenue comme moyen d'évaluation, en raison d'un manque perçu de sophistication technique ou de validation unanime de la méthode [36]. L'objectif de la simulation dans le cadre d'un examen ou d'une licence diffère de la formation en ce que l'objectif n'est pas d'améliorer le niveau de compétence mais de vérifier qu'un candidat a atteint le niveau de compétence requis pour la prise en charge de patient réel en toute sécurité [37]. La question de ce usage des simulateurs numériques reste donc ouverte et appelle à de nouvelles études sur le sujet.

2.3.5 Multiplicité et évolutivité des contenus

La richesse et l'étendu des bibliothèques d'exercices et de contenus varient énormément selon la marque de simulateur et la dynamique des équipes de développement. Pour les modèles les plus aboutis, les exercices préenregistrés sont nombreux, autoportants et couvrent la plupart des disciplines enseignées en formation pratique initiale. Et les possibilités de création d'exercices additionnels sont théoriquement illimitées.

Certains simulateurs, tels que le VirtEasy®, permettent en plus des exercices courants, l'initiation pratique à l'implantologie. Dans les programmes d'enseignement français actuels, cette discipline en plein essor n'est abordée qu'au cours de la 5^{ème} année, et uniquement sous l'angle théorique. La mise en œuvre pratique n'intervient quant à elle que plus tard en 6^{ème} année. L'inconvénient de cette décorrélation temporelle entre théorie et pratique est qu'elle n'est pas favorable à une bonne appréhension clinique de ces procédures spécifiques par les étudiants [5]. Avec ces modules d'implantologie sur simulateurs numériques, il devient possible, sans surcoût de formation, d'initier de façon cohérente et plus précoce les étudiants à la planification et à la pose d'implants virtuels, au plus près de la réalité clinique moderne. Ceci représente un réel atout à une époque où la maîtrise de l'implantologie est en passe de devenir incontournable, même pour un omnipraticien.

2.3.6 Les avantages de la dématérialisation : économie et accessibilité

La sécurisation des exercices (*paragraphe 2.3.1*).

La réduction des coûts et de l'entretien :

Dématérialiser les équipements, c'est supprimer l'entretien des instruments rotatifs (nettoyage, désinfection, lubrification, stockage, rangement), des instruments manuels et autres petits matériels qui emplissent les malles des étudiants. C'est aussi supprimer les consommables (en particulier les fraises et forêts). Ces suppressions diminuent d'autant les coûts supportés par l'université et les étudiants. Accessoirement, la dématérialisation, c'est également mettre fin aux

disparitions inexplicables de certains matériels, qui peuvent parfois entraver le bon déroulement des travaux pratiques.

Plus d'entretien non plus, ni de coût lié aux systèmes hydrauliques et pneumatiques, ce qui présente d'ailleurs l'autre avantage d'être plus respectueux de l'environnement.

Les enseignements à distance

Les systèmes éducatifs et professionnels évoluent rapidement, accélérés par la crise sanitaire qui a contraint tous les milieux socio-économiques à s'adapter. De nouveaux concepts et des moyens plus accessibles ont été mis en œuvre. L'apprentissage à distance s'est démocratisé, du primaire jusqu'au supérieur. Le domaine de la santé est bien sûr partie prenante, avec des membres du personnel ou des spécialistes capables d'analyser les préparations effectuées par les étudiants et de fournir un avis d'expert à distance [7]. Les programmes d'enseignement, et les méthodes pédagogiques associées, se voient eux aussi adaptées, pour augmenter la part de diffusion de contenus théoriques et pratiques en distanciel, voire les rendre consultables à la demande. Les universités et campus les plus dynamiques développent également de plus en plus de sessions en immersions 3D, sous forme de classes virtuelles pour regrouper à distance les enseignants et étudiants dans un même environnement de travail avec des fonctionnalités complémentaires et innovantes.

Ces exemples doivent nous inciter à inclure dans nos réflexions les innovations pédagogiques pour nous adapter aux nouvelles contraintes sanitaires et matérielles tout en conservant la qualité de nos approches holistiques pour la prise en charge des patients.

2.3.7 Promotion de l'excellence et attractivité

Les universités françaises s'équipent de plus en plus en outils de simulation virtuelle, en s'inspirant du modèle américain, pionnier dans le domaine de la simulation virtuelle en santé. Outre Atlantique, la simulation fait partie intégrante du cursus universitaire, elle est utilisée chaque jour. On l'exploite dans les disciplines médicales et paramédicales [38].

La Figure 12 fait apparaître les établissements de formation, essentiellement universitaires, qui sont équipés de simulateurs numériques de type VirtEasy® : France (Lille, Paris Descartes, Paris Diderot, Nantes, Bordeaux), Royaume-Uni, Espagne, Italie, Inde (2 universités), Pakistan, Kazakhstan, Ouzbékistan, Chili (2 universités), Qatar. Sachant qu'il ne s'agit là que du déploiement d'un seul modèle de simulateur numérique, on peut imaginer que la tendance globale de passage à la RV est bien plus importante.



Figure 12 : Etablissements équipés de simulateurs VirtEasy® à travers le monde en 2022.

La majorité de ces centres de simulation sont rattachés à des universités, qui communiquent et mettent en avant leurs équipements numériques, telle une vitrine pour la promotion de l'excellence de leur établissement. A l'heure actuelle, une université ne disposant pas de ce type de centres est nettement moins prisée par les étudiants, qui recherchent la formation la plus complète qui soit, comme par les patients qui recherchent une sécurité de soins [38].

2.3.8 Déontologie et éthique

Le code de santé publique, précise la chose suivante [5] :

Article L 1211-2 : « Le prélèvement d'éléments du corps humain et la collecte de ses produits ne peuvent être pratiqués sans le consentement préalable du donneur. »

Déontologiquement et légalement, se pose alors la question du consentement éclairé des patients dont on conserve des dents extraites afin d'en faire don à la formation universitaire. De nos jours pour les travaux pratiques en odontologie, on privilégie de plus en plus les dents synthétiques. Toutefois, des dents naturelles sont encore occasionnellement utilisées, et ce sans recueil de consentement. Le recours à une forme virtuelle de simulation pour les entraînements pratiques en faculté permet de s'affranchir de cette non-conformité au code de santé publique.

3.1 Les principaux objectifs pédagogiques en odontologie

Les objectifs pédagogiques suivants sont fondamentaux pour l'enseignement en odontologie et doivent être pris en considération pour toute conception de supports et de contenus pédagogiques [5] :

- l'entraînement aux gestes techniques (usuels ou exceptionnels) ;
- la mise en œuvre de procédures (individuelles ou en équipe) ;
- l'entraînement au raisonnement clinique diagnostique et/ou thérapeutique ;
- la gestion des comportements (mise en situation professionnelle, travail en équipe, communication, etc...) ;
- la gestion des risques (reproduction d'événements indésirables, capacité à faire face à des situations exceptionnelles, etc...).

3.2 Cahier des charges d'un outil pédagogique numérique idéal

Pour un centre de formation en santé, telle qu'une faculté de chirurgie dentaire, qui chercherait à s'équiper en nouveaux outils pédagogiques numériques, quelles qualités et caractéristiques ces derniers devraient-ils réunir ?

Des premiers éléments de réponses se trouvent dans le Guide des bonnes pratiques de la HAS [39] à propos de la formation et l'évaluation par la simulation en santé. Ce guide s'appuie sur l'analyse de cent neuf études scientifiques issues de plusieurs revues de la littérature sur le sujet et couvrant une période de trente-cinq ans (1969-2003). Cette analyse a été réalisée selon un protocole standardisé, et répond aux principes de l'Evidence Based Medicine. Elle met en avant les objectifs suivants (par ordre décroissant d'occurrence dans les études concernées) :

- Le **debriefing** et la **pratique répétée** sont des éléments essentiels de la simulation ;
- L'intégration de la **simulation** dans le parcours global de formation (initiale ou continue) ;
- La formation doit être réalisée avec des niveaux de difficulté croissants en utilisant **plusieurs stratégies d'apprentissage** ;
- La formation doit permettre de **reproduire des situations cliniques variées**, dans un environnement contrôlé, où les apprenants peuvent **faire, détecter ou corriger des erreurs sans risque** ;
- Les exercices pédagogiques avec simulation doivent être **reproductibles, standardisés** et impliquant activement les participants ;
- Les objectifs pédagogiques doivent être précis et explicites, permettant des **comparaisons** et des **résultats mesurables** ;

En complément à ces derniers objectifs, et pour intégrer notamment les enjeux décrits au paragraphe 1, ajoutons les objectifs suivants, auxquels un outil pédagogique numérique idéal devrait satisfaire :

- Conditions de sécurité assurées pour les intervenants et les encadrants
- Adéquation des infrastructures, environnement et locaux
- Applicabilité des objectifs pédagogiques
- Conformité avec les cadres réglementaires
- Facilité d'accès et disponibilité
- Ergonomie, facilité de prise en main pour les intervenants comme pour les encadrants
- Evolutivité
- Interactivité, ludicité
- Adéquation avec le niveau de réalisme souhaité
- Confidentialité
- Objectivité et équité des retours et des évaluations
- Déontologie
- Coûts de mise en œuvre et de fonctionnement viables
- Fiabilité

3.3 Quels types de simulation privilégier ?

3.3.1 Outil d'aide au choix d'une technique de simulation

Les techniques de simulation choisies doivent être pertinentes et systématiquement adaptées aux objectifs pédagogiques et aux approches visées.

Dans la partie « Outils du guide méthodologique » [34], la HAS joint des fiches pratiques pour illustrer à titre indicatif différentes techniques de simulation en santé avec des cas concrets. Ces outils sont à voir avant tout comme des aides pour orienter et élaborer les programmes de simulation afin de mettre en œuvre des solutions pédagogiques face à des risques présents ou prévisibles dans le domaine de la santé.

Dans une optique d'aide à la décision pour le choix d'une technique adaptée, le Tableau 4 propose notamment différentes modalités de mise en œuvre.

Tableau 4 : Outil d'aide au choix d'une technique de simulation selon le programme visé, HAS [34].

Simulation Fiches programmes (cf. outils du guide méthodologique)	Techniques utilisables							
	Simulation humaine			Simulation synthétique		Simulation électronique		
	Patient simulé	Patient standardisé	Simulation hybride (synthétique et patient simulé)	Simulateur procédural	Mannequin, simulateur d'intervention	Jeux sérieux	Réalité virtuelle, 3D	Réalité augmentée
Apprentissage d'un geste technique ou d'une procédure			+	+		+	+	+
Test d'un environnement de travail			+				+	+
Compétences non techniques et travail en équipe	+		+		+		+/-	+/-
RMM simulée	+		+		+	+	+	+
Chambre des erreurs					+	+	+	+
Analyse de scénario clinique d'EIAS simulé			+			+	+	+
Annnonce d'un dommage associé aux soins	+	+						
Formation des professionnels de santé à l'éducation thérapeutique et carte conceptuelle	+							
Communication de crise médicale	+	+			+			

3.3.2 Le choix entre simulateurs dentaires physiques et numériques

S'agissant de l'apprentissage de gestes techniques, domaine pour lequel la simulation en odontologie est la plus utilisée actuellement, cherchons à identifier le type de simulateur le plus efficient, c'est-à-dire celui conduisant aux meilleurs résultats avec le moins de moyens. Une étude de 2017 menée par l'université de Plymouth, en Grande Bretagne [10], vise à apporter des éléments de réponse à travers un comparatif entre simulateurs dentaires numériques et simulateurs conventionnels physiques pour la formation préclinique.

D'après cette étude, les étudiants formés sur des simulateurs conventionnels se voyaient accorder cinq fois plus de temps de la part du corps professoral que ceux formés sur des simulateurs de réalité virtuelle. Ce temps supplémentaire accordé ne se traduisait cependant pas par des différences significatives en terme de qualité des préparations. Dans un contexte qui impose de former notablement plus d'étudiants avec un même nombre d'encadrants, les simulateurs numériques peuvent donc apparaître comme un type de simulation particulièrement indiqué.

En terme d'expérience d'apprentissage, plusieurs études interrogeant des étudiants en odontologie sur leurs préférences semblent faire apparaître la simulation VR comme perçue plutôt positivement [7]. La plupart (87,3 %) des étudiants de première année de la Tennessee Dental School travaillant sur CVRS ont trouvé l'expérience « très intéressante » ou « intéressante ». Les points positifs les plus remontés étaient :

- des gains en compétences psychomotrices et en coordination œil-main ;
- des gains en rapidité de réalisation des préparations ;
- des gains en autonomie et en auto-évaluation grâce aux « feedbacks » du simulateur [7,35], qui réduisent les besoins d'intervention de l'enseignant ;
- un suivi plus global et individualisé de la progression [7,31] ;
- une meilleure préparation aux évaluations avec des exercices répétés [7,35];
- la cohérence des évaluations.

Les étudiants ont également fait part de critiques à propos du niveau de rétroaction jugé excessif, de certaines difficultés techniques avec le matériel, et d'un manque de contact humain. Ces derniers points sont toutefois à nuancer. En effet, même si elle conserve la préférence des étudiants, la supervision humaine montre également à leurs yeux certaines incohérences entre les enseignants, voire des insuffisances lorsque ces derniers sont trop accaparés. Le manque ressenti de contact humain est d'ailleurs un point surprenant et qui mériterait d'être explicité auprès des étudiants audités : que ce soit sur simulateurs physiques ou virtuels, la part de contact humain est fonction uniquement de la disponibilité de l'animateur et non du support de simulation. Enfin, s'agissant des feedbacks potentiellement excessifs, nous avons vu au paragraphe 2.2.5 qu'un paramétrage conforme du simulateur permettait de les ajuster.

Toutes ces observations mènent à une première remarque : les simulateurs virtuels présentent une balance bénéfices/risques très favorable, avec des avantages et des gains avérés. A l'inverse, il subsiste uniquement deux réels points de vigilance à considérer. Le premier est le coût à l'achat, point sur lequel nous reviendrons par la suite. Le second porte sur les procédures non simulables virtuellement. Sur ce dernier point, il semble effectivement y avoir un consensus [40–44] autour de l'idée que les CVRS ne puissent pas complètement remplacer les simulateurs physiques conventionnels en l'état actuel, et qu'une combinaison des deux apparaît comme l'approche la plus indiquée et la plus efficace.

Pour aller plus loin que la simple comparaison des avantages et inconvénients de chaque technologie, le Tableau 5 fait apparaître leurs apports vis-à-vis des nouveaux enjeux décrits au paragraphe 1. On note alors que les simulateurs virtuels haptiques constituent une contribution favorable pour chacun de ces nouveaux enjeux :

- Nécessité d'une formation plus efficace pour des promotions grandissantes avec des moyens humains et matériels constants voire en baisse ;
- Recherche de davantage d'équité et d'objectivité dans les travaux pratiques et évaluations ;

- Respect des cadres réglementaires : normes sanitaires, CSP, CHSCT, Code de déontologie...
- Engouement grandissant pour les nouvelles technologies et les outils pédagogiques immersifs ;
- Recherche de davantage d'expérience et de maîtrise technique vis-à-vis du risque juridique ;
- Volonté de gagner en notoriété et attractivité en développant les collaborations universitaires et industrielles au niveau local, national, voire international.

Tableau 5 : Synthèse des avantages et inconvénients entre simulateurs physiques et virtuels

	Simulateur physique	Simulateur virtuel haptique
Points positifs	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> un retour d'expérience de plusieurs décennies, <input type="checkbox"/> plus économique à l'achat <input type="checkbox"/> une ergonomie plus facile d'accès <input type="checkbox"/> la présence de personnels techniques déjà formés et compétents <input type="checkbox"/> l'autonomie de développement de nouveaux exercices 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> la sécurisation des travaux pratiques <input type="checkbox"/> l'acquisition plus efficace des compétences psychomotrices nécessaires <input type="checkbox"/> l'autonomie et la personnalisation de l'apprentissage <input type="checkbox"/> une approche clinique théoriquement plus globale et réaliste <input type="checkbox"/> pas ou très peu de coûts de fonctionnement <input type="checkbox"/> économique pour les étudiants <input type="checkbox"/> l'évolutivité vers de nouveaux contenus, comme l'implantologie <input type="checkbox"/> Conformité aux codes de déontologie et de santé publique
Points négatifs	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> niveau de réalisme selon les modèles testés <input type="checkbox"/> part de subjectivité propre à chaque enseignant <input type="checkbox"/> défaillances matérielles fréquentes et contraignantes <input type="checkbox"/> coûts incompressibles de maintenance et de personnel <input type="checkbox"/> entraînements plus coûteux pour les étudiants <input type="checkbox"/> exposition à certains pathogènes <input type="checkbox"/> question éthique vis-à-vis des dents naturelles 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> l'impossibilité de simuler certains gestes à l'heure actuelle <input type="checkbox"/> l'investissement initial conséquent <input type="checkbox"/> le temps de familiarisation avec ce type d'interface <input type="checkbox"/> variabilité d'ergonomie et de réalisme entre les modèles <input type="checkbox"/> manque de visibilité sur la longévité de certaines marques <input type="checkbox"/> nécessité de compétences spécifiques pour l'entretien et l'animation
Contributions aux nouveaux enjeux de la formation en santé	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> respect des contraintes budgétaires sur le court terme 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> formation plus efficace et moins sollicitante pour le corps professoral (intérêt pour les promotions grandissantes) <input type="checkbox"/> gain en équité et en objectivité des renvois d'image et évaluations <input type="checkbox"/> modernisation et attractivité pour la faculté <input type="checkbox"/> distanciation possible pour les modèles en distanciel <input type="checkbox"/> nouvelles perspectives de formations à l'externe, de recherche, et d'autofinancement <input type="checkbox"/> propice à la mutualisation et à la collaboration avec d'autres universités et entreprises

3.3.3 Le choix entre les différents simulateurs dentaires numériques

A présent, si l'on se place dans le cas où l'on souhaiterait renouveler ou compléter son parc de simulation avec des simulateurs VR haptiques, comment choisir un modèle parmi les différents présents sur le marché? Voyons ci-après les caractéristiques, avantages et inconvénients des principaux simulateurs numériques dentaires pour lesquels on trouve des données représentatives dans la littérature scientifique :

- ⇒ **DentSim™**. Développé en 1997, ce simulateur est composé d'un mannequin à tête fantôme, d'un ensemble d'instruments, de capteurs et d'une caméra infrarouge, d'un écran et deux ordinateurs comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessous. Les caméras infrarouges peuvent capturer l'orientation et le mouvement des dents en résine et d'une pièce à main afin de montrer le travail des étudiants virtuellement sur l'écran de l'ordinateur en temps réel. L'unité permet aux étudiants de voir l'évaluation de leur préparation dentaire par rapport à la préparation idéale sur l'écran, tout en leur offrant la possibilité de continuer à travailler sur les dents en résine. L'inconvénient de cette unité est qu'elle repose sur des dents en résine physique, qui sont des consommables jetables [16].



Figure 13 : Simulateur DentSim®

- ⇒ **VESD®**, pour Virtual Education System for Dentistry. Simulateur de prothèse développé en Chine par le CHU de Nanjing et la Suzhou Digital-health Care Company. Il repose sur la plate-forme d'apprentissage virtuel en ligne (VLNP) et le système de formation et d'évaluation dentaire en temps réel (RDTES) [16]. Avant les travaux pratiques, les étudiants accèdent aux contenus du VLNP, notamment les instructions opérationnelles, les critères de préparation, ou encore des tutoriels vidéos. Ensuite, les étudiants peuvent effectuer des préparations de couronne sur tête fantôme sous la supervision du RDTES qui enregistre les travaux et les résultats, et apporte automatiquement une évaluation des préparations selon des critères prédéfinis. Les étudiants peuvent également comparer visuellement sur l'écran leurs travaux avec les standards prédéfinis.

- ⇒ **IDEA®**, (Assistant d'enseignement dentaire individuel). Simulateur composé d'un ordinateur et d'un stylet haptique, spécifiquement conçu pour le développement de la dextérité manuelle à l'usage des pièces à main dentaires à travers des exercices de retrait de matériaux virtuels de différentes formes. Par conséquent, IDEA ne vise pas à former les étudiants à des procédures particulières telles que la préparation de couronnes ou le détartrage. Toutefois, il existerait des applications additionnelles portant sur des exercices de carologie, d'obturation canalaire, de radiographie, ou encore de dépose de bridge. Le principal avantage du système est son système d'évaluation. Lors de la simulation, deux paramètres déterminent un score : la vitesse et la précision de forage. Un écart de trajectoire ou une profondeur inappropriée peut entraîner une diminution de la jauge de précision retransmise à l'écran. L'élève doit obtenir un score minimum défini pour valider le test. Certaines études avancent que l'IDEA pourrait améliorer les performances des étudiants aux évaluations pratiques. En outre, il peut être utilisé pour le dépistage et l'interception précoce des problèmes de dextérité manuelle pour prévenir l'échec de certains étudiants. Cependant, d'autres études signalent que la sensation tactile devait être considérablement améliorée pour une simulation plus fidèle [29].
- ⇒ **PerioSim®**. Simulateur composé d'un écran, d'un ordinateur et d'un dispositif haptique permettant aux étudiants d'utiliser des instruments dentaires virtuels pour visualiser et détecter les caries et les maladies parodontales dans un environnement virtuel haptique [45]. Le système est disponible en ligne pour les étudiants et permet aux enseignants de lancer différents programmes de formation, qui peuvent être téléchargés et rejoués par les étudiants à tout moment. Steinberg et al ont rapporté que l'affichage de l'image et le retour de force étaient très réalistes pour les dents et les instruments dentaires, mais pas pour les tissus gingivaux le réalisme des instruments virtuels et des structures gingivales ainsi que le réalisme de la rétroaction tactile présentaient certaines limites qui nécessitaient d'être améliorées [46].

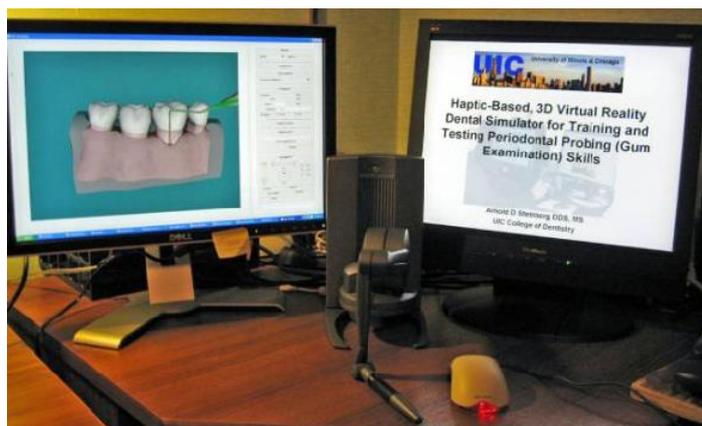


Figure 14 : Simulateur PerioSim®, d'après [47]

- ⇒ **iDental®**. Simulateur d'éducation aux compétences parodontales, développé par l'université de Pékin en Chine, qui peut simuler des examens parodontaux et des procédures de traitement, telles que le sondage parodontal et l'élimination du tartre. Contrairement à PerioSim®,

l'appareil utilise principalement un moniteur 2D. En revanche il dispose d'un stylet odontoscope et il peut donc être utilisé pour une pratique à deux mains, ce qui lui fait gagner en réalisme. Un module d'enseignement théorique est également proposé pour l'apport des connaissances parodontales de base en amont des exercices pratiques, ce qui améliore l'efficacité de l'enseignement [48].

⇒ **Simodont®**. Simulateur développé par l'ACTA, Academic Center for Dentistry of Amsterdam, et composé d'un ordinateur et de mini projecteurs qui diffusent la scène de travail en 3D (Figure 15 ci-dessous). L'interaction et le retour de force sont opérés à l'aide de dispositifs simulant un rotatif et un miroir. Largement utilisé dans les centres de formation et facultés dentaires, dont notamment celle de l'université de Lorraine, il comprend des modules de dextérité manuelle, de cariologie, de cavités d'accès endodontiques, et de préparation de couronnes ou de bridges. Cette bibliothèque d'exercices s'adresse aux étudiants en cours de formation initiale mais aussi aux praticiens souhaitant se préparer à des procédures complexes en créant des profils basés sur de vrais patients. L'un des points forts du système est l'affichage d'une radiographie de la dent de travail pour chaque cas individuel, ce qui apporte une dimension clinique aux exercices [49]. Des retours instantanés sont fournis à l'utilisateur, qui peut également s'entraîner dans une configuration d'examen virtuel. Bakr et al. ont signalé une attitude globalement positive vis-à-vis de l'interface haptique et de ses avantages éducatifs [29].

Le système a toutefois quelques inconvénients. Il nécessite des lunettes 3D pour l'affichage 3D. Le module de préparation périphérique est à arcade unique et reproduit donc l'espace opératoire de façon incomplète. En outre, il ne se prête pas à l'enseignement des exigences de posture car les positions de fonctionnement sont fixes et la modification de l'angle de vue nécessite une action manuelle sur un bouton rotatif.



Figure 15 : Simulateur dentaire Simodont®.

⇒ **Virteasy®** (Figure 16). Simulateur développé par l'entreprise française HRV (Haptique Réalité Virtuelle). Le système permet la connexion d'un ensemble de simulateurs Virteasy® au sein d'une même classe virtuelle. Le poste instructeur dispose de modules dédiés : visualisation à distance de tous les simulateurs, export d'évaluations individuelles ou collectives, diffusion sur vidéoprojecteur. Le système est doté d'une bibliothèque 3D de cavités buccales adultes/enfants au format STL mais permet

également de créer des cas spécifiques à partir de scans radiographiques 3D intra-oraux (STL ou DICOM), y compris pour des planifications d'implantologie et même l'impression de dents synthétiques pour l'utilisation sur têtes fantômes. Les dernières mises à jour incluent plus de 100 exercices : familiarisation, dentisterie restauratrice, endodontie, prothèse et implantologie. Les exercices proposent une grande variété de plateaux, de mâchoires et de patients virtuels, ce qui apporte de la souplesse d'intégration dans les programmes d'enseignement. De plus, le niveau de difficulté est variable et s'adapte donc aux étudiants des différentes années universitaires, ainsi qu'aux praticiens en formation continue [50].

Une nouvelle génération, le Virteasy® V2, est annoncée pour septembre 2022, proposant un niveau de réalisme encore accru avec un rendu 3D co-développé avec les équipes de Epic Games®. Elle comprend de nouveaux exercices préinstallés (micro-endodontie, préparations de bridges, quiz d'anatomie, banque d'exercices internationaux), ainsi qu'un module d'évaluation validé. Elle est également compatible avec les casques 3D VR Oculus® pour une expérience d'immersion 3D complète. Ce système est lui-aussi largement déployé à l'international, notamment à l'université ADEMA en Espagne, à celle de Sheffield au Royaume Uni, ou encore à Lviv en Ukraine et Xiamen en Chine. Des travaux sont d'ailleurs en cours à Nancy et à l'ADEMA pour publier de nouveaux retours d'expérience et les avis déjà disponibles sont positifs : l'approche est innovante, précise et réaliste sur le plan sensoriel. Les retours machine sont fiables et objectifs, et peuvent à présent être utilisés dans le cadre d'évaluations sommatives [51]. La fiabilité et les retours machine sont de bonne qualité et cliniquement pertinents [52].



Figure 16 : Simulateurs VirtEasy®

⇒ **IDEAL®**, pour Internet of Things–based Education and Learning. Ce simulateur est dédié à l'enseignement de la radiologie. Il sert essentiellement à apprendre la prise de clichés radiographiques intra-oraux, et ce sans exposition aux rayonnements X. Le système est composé d'un cône, d'un corps de simulateur, d'un capteur et d'un détecteur. La formation inclut des apports de base sur l'imagerie par rayons X et ses différentes techniques, ainsi qu'une bibliothèque de tests et un système d'évaluation et de rétroaction. Les étudiants s'exercent à la prise des clichés radiographiques selon différentes localisations et angulations. A l'issue de l'exercice, les étudiants reçoivent des commentaires et des évaluations de la part du système. Le système est sûr et abordable [16].

⇒ **Voxel-Man®**. Simulateur pour la chirurgie, principalement utilisé pour simuler la chirurgie apicale, telle que la résection apicale. Il se compose d'un écran 2D, d'un bras de commande chirurgicale simulée, d'une pédale et de lunettes 3D. Différents modes sont proposés selon le niveau des stagiaires, avec des interfaces d'affichage et des instructions d'utilisation adaptées au mode choisi. Les structures anatomiques importantes peuvent être affichées en couleurs vives, pour mesurer en temps réel la portée et l'amplitude des gestes et aider à éviter de les léser. Lorsque l'instrument simulé se trouve à proximité d'une structure anatomique noble, le système émet un signal sonore. En mode expert et en mode examen, certaines fonctions et astuces sont désactivées. Les travaux peuvent être enregistrés et visionnés ultérieurement pour aider à la progression. L'opération peut être interrompue et recommencée à chaque instant en cas d'erreur par exemple [53].

Après ces descriptifs, voyons à présent sous la forme d'un tableau de synthèse un comparatif de ces neuf simulateurs virtuels :

Tableau 6 : Caractéristiques de différents simulateurs VR haptiques dentaires, d'après [16,29].

	Dentsim®	VESD®	IDEA®	PerioSim®	iDental®	Simodont®	VirtEasy®	IDEAL®	Voxel-Man®
Equipements matériels	Affichage 2D + tête fantôme	Affichage 2D + tête fantôme	Affichage 2D + 1 bras haptique à 6 degrés de liberté	2 écrans 2D + Lunettes 3D + 1 bras haptique à 3 degrés de liberté	Affichage 2D	1 Affichage 2D + 1 Affichage 3D avec lunettes 3D + Pièce à main et miroir	1 Affichage 2D tactile + 1 Affichage 3D avec lunettes 3D + 1 bras haptique à 6 degrés de liberté et un stylet	Affichage 2D + tête fantôme	Affichage 2D + Lunettes 3D
Dents utilisées	synthétiques	synthétiques	virtuelles	virtuelles	NC	virtuelles	virtuelles	synthétiques	virtuelles
Domaines d'application	Préparations dentaires	Préparations périphériques	Entraînements de dextérité	Parodontologie	Parodontologie	Curetage carieux et cavités d'accès Préparations périphériques	Curetage carieux Préparations périphériques Implantologie	Radiographie	Chirurgie
Compétences fondamentales	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Postures ergonomiques	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Repose-doigt fixe	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Utilisation bimanuelle	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible
Droitier et gaucher	✓	NC	✓	✓	NC	✓	✓	NC	NC

	Dentsim®	VESD®	IDEA®	PerioSim®	iDental®	Simodont®	VirtEasy®	IDEAL®	Voxel-Man®
Rétroaction instantanée	✓	NC	✓	✗	NC	✓	✓	NC	NC
Evaluation des résultats	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Simulation d'examen	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pratique répétitive	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Niveaux d'expertise	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓
Apprentissage individualisé	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
Transfert direct des données à l'instructeur	✓	NC	✓	✗	NC	✓	✓	NC	✓
			Mode relecture. Possibilité de visionner une tâche dans son intégralité			Suivi de 6 postes en direct en simultané Enregistrement de tous les postes.	visualisation de tous les postes de la classe, export d'évaluations individuelles ou collectives, diffusion sur vidéoprojecteur.		

*NC : information non connue.

A l'aide du tableau ci-dessus, on note que deux simulateurs se distinguent des autres, le Simodont® et le VirtEasy®, et ce pour diverses raisons. D'une part, parce que ce sont les seuls à répondre pleinement à des besoins en formation d'omnipratique. Les autres étant plus spécifiquement dédiés à certaines disciplines (parodontologie, chirurgie, radiologie, prothèse), ils pourront bien sûr être employés en compléments pour développer certains aspects précis des programmes de formation, mais ne répondent pas à notre cahier des charges, compte tenu de l'un des inconvénients principaux des simulateurs numériques qui est de ne pas simuler l'ensemble des protocoles souhaités.

D'autre part, le Simodont® et le VirtEasy® sont déjà déployés dans d'autres universités françaises, ce qui est une condition nécessaire aux démarches de mutualisation et de collaboration pour gagner en sérénité et en efficacité dans la conduite d'un tel projet.

Au global, le VirtEasy® est celui qui présente le plus grand nombre d'avantages et d'options :

- L'intégration de l'implantologie dans sa bibliothèque d'exercices ;
- Un mode évaluation que ne propose pas le Simodont® ;
- Une configuration d'apprentissage individualisé ;
- Une meilleure connectivité VR avec la compatibilité du casque 3D Oculus®, le mode Classroom virtuel et la possibilité d'export vers une imprimante 3D ;
- Une meilleure évolutivité, avec une bonne dynamique de développement de nouveaux contenus.

Notons enfin qu'en terme de coût d'investissement initial, principal point de vigilance qui ressort de cette analyse des simulateurs virtuels, le fournisseur HRV annonce avoir remporté l'ensemble des appels à projet en France ces dernières années. Sans avoir été en mesure de vérifier cette information, nous considérons qu'elle constitue un signal positif notable à mettre au crédit du VirtEasy®, compte tenu du fait que le prix est un critère prépondérant dans l'attribution des marchés publics.

Dernier point, il appartiendra au porteur du projet de se faire sa propre idée de la solution la plus adaptée en terme notamment d'ergonomie, de niveau de réalisme, et d'évolutivité. Mais, au-delà des aspects purement techniques, retenons que le choix du modèle doit être pris en premier lieu selon les perspectives de partenariat avec une entreprise installatrice fiable et les opportunités de mutualisation avec d'autres centres de formation.

3.3.4 Quelles alternatives aux simulateurs numériques pleine échelle ?

La plupart des facultés d'odontologie ont recours à des mannequins physiques à minima pour les deux premières années d'enseignement. Avec les avancées technologiques, des méthodes d'enseignement alternatives se développent, telles que les simulations basées sur la VR/AR. Ces supports d'apprentissage sont sûrs et fiables pour apporter aux étudiants la motricité fine indispensable en médecine bucco-dentaire, voire leur permettre de se forger une forme d'expérience clinique en amont des premières mises en situation réelles [54].

Les applications et combinaisons des technologies de RV et RA sont théoriquement illimitées. Dans ce vaste paysage technologique, il n'est pas nécessairement pertinent de se concentrer exclusivement sur les simulateurs pleine échelle qu'ils soient physiques ou numériques. Selon les objectifs pédagogiques et les contraintes techniques et matériels inhérentes au centre de simulation, on pourra intégrer d'autres types de supports pédagogiques, par exemple pour leurs avantages en terme de coût, d'accessibilité ou de simplicité.

Voyons ci-après quelques exemples non exhaustifs d'alternatives ou de compléments aux simulateurs pleine échelle :

- ⇒ **UniSim®**, simulateur RV haptique micro compact de l'entreprise HRV. C'est le premier simulateur dentaire portable au monde. Il est disponible en location. Il a été développé initialement pour répondre aux problématiques de facultés fermées lors des confinements, dans le but d'équiper les étudiants avec un kit transportable pour maintenir les enseignements pratiques à domicile. Composé d'un bras haptique, d'un ordinateur et d'une retransmission de RV en 3D sur écran, il est proposé en deux configurations selon qu'on veuille un ordinateur fixe ou portable, telles que le montrent les images de la Figure 17 ci-après.



Figure 17 : Micro simulateur UniSim®, à gauche en version transportable, à droite en version fixe.

Il fait appel à une bibliothèque de modules de simulation couvrant plusieurs disciplines de santé (Figure 18) et est à ce titre mutualisable pour des travaux d'enseignements pratiques ou de recherche au sein d'une ou plusieurs universités.

Plus économique qu'un simulateur pleine échelle (environ 20 000€, PC inclus), il est évolutif, compatible avec les casques de RV en 3D Oculus®, livré avec un PC configuré et tous les accessoires nécessaires aux types de simulation choisis : pédales, repose-doigts, pièces à main et instruments personnalisés.

BIBLIOTHÈQUE DE SIMULATIONS

PRÉ-CLINIQUE DENTAIRE	CHIRURGIE BUCCALE	PONCTION LOMBAIRE	INFILTRATION DU GENOU	PONCTION PULMONAIRE	LAVAGE DES MAINS	ANESTHÉSIE (À CONFIRMER)
						
Des simulations de restauration de base aux chirurgies buccales complexes.	La seule simulation commerciale au monde en chirurgie buccale.	Simulation d'entraînement haptique de ponction lombaire.	Simulation d'entraînement haptique d'infiltration du genou.	Simulation d'entraînement haptique de ponction pulmonaire.	Simulation activée par le suivi des mains VR pour l'enseignement du lavage des mains.	(Prototype) Bâtiment en collaboration avec l'ADEMA (Espagne).

Figure 18 : Bibliothèque de simulations mutualisable couvrant différentes disciplines de santé

⇒ **Les Serious Games** qui connaissent un développement important depuis quelques années. Comme expliqué plus en amont, ils immergent l'apprenant dans un univers totalement virtuel recréant la réalité clinique avec un niveau de fidélité souhaité. La réduction des coûts est considérable puisque, du simulateur, il ne reste que le ordinateur, rendant obsolète tout objet technique matériel [39].

Ci-dessous, trois exemples de thématiques traitées sous la forme de serious games par l'université de Paris :

- **Projet OReal** : développement de modules pédagogiques hybrides de réalité virtuelle immersive pour l'apprentissage de l'anatomie appliquée et la planification chirurgicale en formation pré-clinique et clinique en odontologie.
- **Projets SERIODONT** : évaluation de modules pédagogiques hybrides basés sur les jeux sérieux pour l'apprentissage des compétences techniques et non techniques en odontologie ;
- **IMMERSIMS** (IMMERSion pour la SIMulation en Santé) : projet serious games de la faculté santé pour l'apprentissage de l'hygiène des mains. Projet mené de façon transverse entre les différentes disciplines médicales et paramédicales de l'université.

⇒ **L'immersion 3D - centre de simulation LabForSims**, Université Paris Saclay, CEA et HRV : au moyen d'un casque de RV 3D, l'outil génère des mises en situation professionnalisante en immersion totale en 3D avec patient virtuel, capable d'interagir et de répondre aux questions du soignant. Dans le scénario illustré ci-dessous (Figure 19), l'exercice porte sur le diagnostic et la prise de décision thérapeutique.



Figure 19 : Entraînement LabForSims en immersion 3D pour le diagnostic et la prise de décision thérapeutique.

⇒ **Immersion 3D – La plateforme MedicActiV**, accompagne depuis plus de cinq ans des organismes de formation, des CHU ou des centres de simulation dans la diffusion ou la création d'outils numériques innovants pour la formation initiale et continue des professionnels de santé. Elle a été créée en collaboration avec le CHU de Bordeaux par la société SimforHealth réunissant des professionnels de santé, des ingénieurs pédagogiques et des ingénieurs spécialisés en RV, et notamment ceux du Laval Virtual Center Arts et Métiers. Pour aider les centres hospitaliers engorgés lors de la crise de la Covid-19, des modules ont par exemple été développés et mis à disposition des équipes soignantes pour les former à la prise en charge spécifique des patients Covid.

Un autre module innovant « *les agents virtuels expressifs* » (Figure 20), permet de travailler sur la distinction et l'interprétation des facteurs d'expressivité faciale des patients pour orienter les diagnostics et décisions thérapeutiques [55]. Ce module pourrait être d'une utilité toute particulière en odontologie dont une spécificité est l'incapacité du patient à s'exprimer verbalement en cours de soins.



Figure 20 : Immersion 3D "Les agents virtuels expressifs" pour l'aide à la prise de décision thérapeutique [23].

- ⇒ **Immersion 3D – Axon immersion training** : outil utilisé par la police de Chicago pour former ses agents à appréhender avec plus d'empathie et de sérénité des pathologies mentales telles que les troubles du spectre autistique ou la schizophrénie. L'immersion, telle qu'illustrée dans les images ci-dessous (Figure 21), place alternativement les agents dans le point de vue de la personne souffrant de pathologie mentale puis dans celui d'un agent de police devant gérer une personne malade, désorientée voire menaçante.



Figure 21 : Immersion 3D Axon Training® pour la prise en charge de pathologies mentales.

- ⇒ **Réalité Augmentée - Logiciel Augment®** : téléchargeable gratuitement sur tablette ou smartphone sous iOS ou Android, ce logiciel propose entre autres des exercices d'entraînement et de perfectionnement pour l'anesthésie à l'épine de Spix. Très simple et accessible, il utilise uniquement un carton de repérage 3D fixé sur un stylo ordinaire (Figure 22) pour simuler l'infiltration (axe, profondeur et localisation) sur une cavité buccale réelle filmée par la caméra du smartphone.

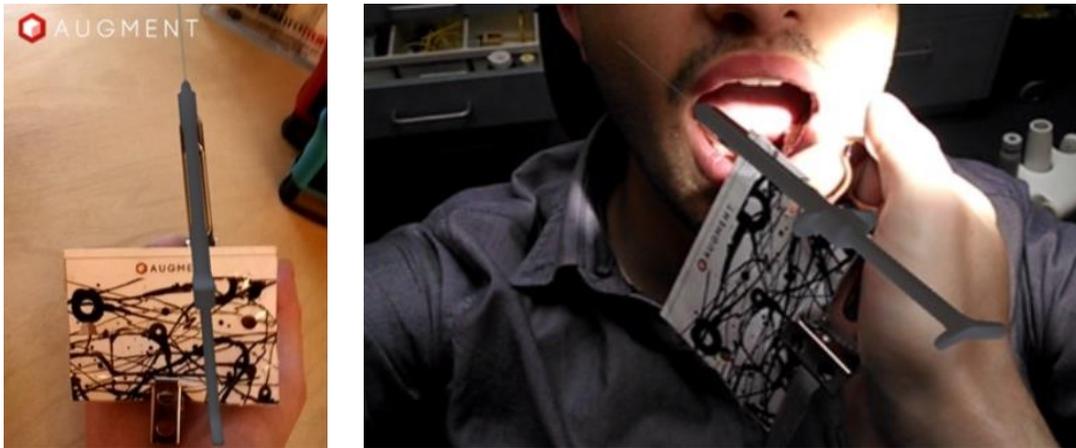


Figure 22 : À gauche le système Augment®, à droite la visualisation 3D augmentée d'un entraînement.

3.4 Analyse des risques et points de vigilance

3.4.1 Fiabilité

Compte tenu de l'investissement que représente un projet complet de formation par la simulation RV au sein d'une faculté, il importe d'investir dans des équipements et services fiables dans la durée. Pour le cas des simulateurs VirtEasy® installés à la faculté de chirurgie dentaire de Lille, nous avons contacté le fournisseur concerné, à savoir l'entreprise HRV. Aujourd'hui cette société se concentre sur la conception et la réalisation d'équipements et de logiciels de RV, dont nos simulateurs dentaires VirtEasy®. L'entreprise TwinMedical est leur partenaire privilégié pour la partie distribution, installation et support. Nous avons pu nous entretenir avec des représentants de leurs directions respectives à propos notamment des points négatifs du retour d'expérience réalisé en 2018. Ils reconnaissent et regrettent les retards et difficultés rencontrés lors du déploiement en 2017 et des mises à jour qui ont suivi. Ils expliquent avoir corrigé depuis les causes de ces défaillances, avec des équipes plus nombreuses et plus expérimentées. A ce jour HRV a installé 150 simulateurs VirtEasy® rien qu'en France, avec un recul de 14 ans sur cette machine en collaboration avec TwinMedical, ce qui est assez remarquable dans ce secteur de start-up et de technologies en évolution permanente. Sur les questions d'entretien et de dépannage, TwinMedical, s'est dit être pleinement en capacité d'assurer le bon état de fonctionnement des simulateurs déjà en place, ainsi que pour de futures projets d'équipements conçus par HRV. Ils proposent des contrats de service annuel, garantissant les maintenances préventives, les mises à jour et l'intervention de techniciens sur place si nécessaire. Ils précisent qu'environ 95% des défaillances rencontrées portent sur la partie software et sont traitées de façon réactive par une prise en main à distance, sans impact sur la continuité pédagogique.

Ces performances de fiabilité annoncées par le constructeur mériteraient d'être confrontées aux retours d'expérience d'autres utilisateurs. Toutefois elles sont cohérentes avec l'expérience faite sur Lille des 3 simulateurs VirtEasy® qui n'ont subi aucune défaillance Hardware depuis leur installation en 2017. Même si les taux d'utilisation actuels ne sont pas

comparables, ce niveau de fiabilité constaté des simulateurs numériques Lillois est assez remarquable en comparaison aux simulateurs physiques.

3.4.2 Ressources humaines qualifiées et en nombre suffisant

La question des ressources humaines qualifiées et en nombre suffisant est un point de vigilance systématiquement mis en avant par le corps professoral utilisant la simulation. Dans les unités de formation, la part allouée à la formation par simulation est bien souvent insuffisamment pesée et intégrée dans les emplois du temps et les programmes de qualification des enseignants [39]. Les formateurs doivent impérativement disposer de temps et de compétences spécifiques pour être en mesure d'assurer la bonne utilisation des matériels numériques et d'animer les séances sans crainte d'interruptions ou de dysfonctionnements.

Ces observations sont confirmées par le retour d'expériences des simulateurs VirtEasy® à la faculté de chirurgie dentaire de Lille. L'exploitation et le maintien à jour de simulateurs numériques est chronophage et fait appel à des compétences techniques avancées. Ils représentent une activité professionnelle à part entière ne pouvant reposer sur une seule et même personne, tout particulièrement lorsque celle-ci est déjà en charge de fonctions hospitalo-universitaires sollicitantes. De même les paramétrages initiaux des programmes de formations, voire d'évaluations, pour chaque matière, requièrent un temps conséquent à prendre en compte dans la charge de travail des enseignants, même si ce n'est que ponctuel au moment de la mise en place.

Pour appréhender au mieux ces points de vigilance, il paraît pertinent d'envisager les actions suivantes :

- ⇒ Estimer la charge de travail allouée à la simulation et l'intégrer dans les emplois du temps des personnels concernés ;
- ⇒ Intégrer la formation initiale et le maintien des compétences des personnels techniques et encadrants, et ce dès l'installation des nouveaux matériels. Spécifier ces besoins en formation dès l'appel d'offre vers les entreprises installatrices. Une bonne pratique est de prévoir deux sessions de formation en salle sur le matériel avec le fournisseur : une 1^{ère} juste en amont du lancement, et une 2^{nde} 3-4 mois après la prise en main pour perfectionnement ;
- ⇒ Solliciter les étudiants de 5^{ème} et 6^{ème} années pour animer une part des sessions de simulation, par exemple dans le cadre du monitorat, au moyen d'un système de compagnonnage ;
- ⇒ En amont de l'acquisition de matériels de simulation, s'assurer de la fiabilité et de la réactivité du fournisseur, en privilégiant notamment les professionnels expérimentés et reconnus dans ce secteur ;
- ⇒ Étudier l'opportunité d'un contrat de maintenance et d'assistance dépannage avec le fournisseur.

3.4.3 Viabilité technique et financière

Pour évaluer la viabilité d'un type de gestion de matériel, il convient de considérer les coûts globaux de fonctionnement, c'est-à-dire ce que coûte concrètement l'équipement, de son acquisition jusqu'à sa mise au rebut, en passant par son installation, son entretien, et ses modes de fonctionnements courants. Il faut inclure dans cet estimatif l'ensemble des charges associées, sans oublier les charges de personnels.

L'investissement initial :

Comme évoqué au paragraphe 2.2.3, le coût à l'achat est conséquent, si bien que c'est davantage l'investissement et l'amortissement à moyen-long terme qu'il importe d'analyser.

Selon Panait et al « *le surcoût initial dans l'acquisition de simulateurs virtuels haptiques se justifie par les gains significatifs en précision, en rapidité d'exécution et en qualité technique des préparations, [...] les économies en termes de remplacement de rotatifs et en consommables, tels que les dents synthétiques, font du simulateur VR non seulement un outil d'enseignement viable, mais aussi peut-être plus rentable sur le long terme* » [56].

Les coûts de fonctionnement et l'amortissement :

Dans l'organisation actuelle de la plupart des facultés d'odontologie, un ensemble de matériels et de consommables sont nécessaires pour les sessions de simulation physique sur tête fantôme : dents synthétiques, modèles type Frasaco®, rotatifs (contre-angle, pièce à main, turbine), kits fraises, digues, matrices, coins interdentaires,... En cumulé, ces fournitures constituent un budget non négligeable [5].

En 2021, d'après les données de l'ACECDL (Association Corporative des Etudiants en Chirurgie Dentaire de Lille), le coût en matériels de base et consommables supporté par chaque étudiant intégrant la faculté est de 2160€. Ne sont pas incluses dans ce kit de base les dents pour les entraînements supplémentaires, ni celles plus coûteuses encore spécialement dédiées à certains travaux pratiques de carologie et d'endodontie.

Nous avons vu par ailleurs au paragraphe 2.2.4 que certaines procédures, non simulables à ce jour en RV, devraient continuer à être enseignées en simulation physique conventionnelle. La conception des programmes de formation et de leur part de simulation virtuelle déterminent donc les économies réalisables. En se basant arbitrairement sur une économie de 50% en matériels, pour une promotion moyenne lilloise de 140 étudiants, on obtient un ordre de grandeur de plus de 150 000€ d'économie annuelle pour les étudiants, soit un peu plus de 1000€ par étudiant. A titre de comparaison, la faculté d'odontologie de Nancy estime à environ 62 000€ par an le coût des dents en résine utilisées en travaux pratiques [9]. Cette valeur est cohérente avec les estimations précédentes, compte tenus des rapports d'effectifs. Ces économies potentielles pourraient être mises à profit, par exemple en matériel informatique pour les utilisations pédagogiques que nous évoquerons plus loin.

La faculté, elle aussi, est assurée de gains en simplicité et en coût de fonctionnement. En effet une salle de simulateurs physiques implique mécaniquement des coûts incompressibles d'entretien et de maintenance.

Les différents circuits constitutifs (eau, électricité, air comprimé, aspiration) requièrent un entretien régulier, des interventions fréquentes de dépannage et une gestion de stock de pièces de rechange (cordons, raccords, joints d'étanchéité, joues, mâchoires supports, ampoules de scialytiques...). Les pannes, liées en grande partie au tartre et aux pertes d'étanchéité, impactent le quotidien des personnels techniques, encadrants et étudiants.

A contrario, la technologie virtuelle haptique bénéficie aujourd'hui d'un recul suffisant pour garantir un très bon niveau de fiabilité dès lors qu'on se fournit auprès d'entreprises solides et expérimentées, comme nous l'avons déjà évoqué au paragraphe 3.4.1. En terme d'entretien courant, les simulateurs virtuels haptiques n'en nécessitent pour ainsi dire aucun, hormis les mises à jour logiciel. Celles-ci sont faites à distance et hors heures de formation dans le cadre d'un contrat annuel de service (proposé à 5 000€ par exemple chez HRV), ou réalisées par un personnel du centre de formation selon ses ressources et son organisation interne. Les coûts de fonctionnement des simulateurs numériques se résument donc à leur seule consommation électrique.

Ressources humaines – les effectifs et compétences spécifiques :

Comme vu précédemment, une fois la phase de lancement initiale passée, le personnel spécifiquement dédié au fonctionnement du centre de simulation est primordial ; il contribue à l'optimisation des ressources et donc à l'efficacité des programmes de formation. Les charges de personnels correspondantes (techniciens et formateurs) ne doivent pas être sous-estimées et peuvent représenter de l'ordre de la moitié du budget de fonctionnement [57].

Dans le cas d'une faculté d'odontologie comme celle de Lille qui possède déjà un important parc de simulateurs physiques, des personnels techniques sont déjà en place pour assurer l'entretien des machines existantes. Dans un schéma où l'on remplacerait même partiellement les simulateurs physiques par des modèles numériques haptiques, il est raisonnable de penser qu'au moyen d'une formation adéquate ces personnels soient en capacité d'assurer l'entretien du nouveau parc sans qu'il n'y ait besoin de renforcer les équipes.

On retiendra par ailleurs que la dimension du parc de simulateurs et la mutualisation avec d'autres centres de simulation sont des moyens de diminuer ces charges de façon très significative.

Les délais de financement :

Pour un projet d'équipements pédagogiques de simulation, les délais d'obtention des financements initiaux peuvent aller jusqu'à trois ans [8]. Il apparaît donc impératif de bien peser en amont la dimension financière du projet et d'anticiper autant que nécessaire les étapes préalables d'analyse, de prise de décision et d'instruction en vue d'une évolution ou du renouvellement de son parc de simulation. Il convient également de considérer toutes les sources potentielles de partenariats et de financements pour tendre vers l'autofinancement, en tablant sur des sources de revenus diversifiées et des objectifs réalistes de progression des activités de formations.

3.4.4 Accessibilité et disponibilité des outils informatiques nécessaires

Comme vu plus haut, un des principaux atouts des outils pédagogiques numériques relève de la dématérialisation ainsi que de la connectivité à distance.

De nos jours, les étudiants disposent tous d'un ordinateur personnel, mais il importera de s'assurer que ces matériels informatiques aient une configuration et des performances suffisantes, notamment en terme de graphisme, pour une expérience immersive satisfaisante avec les outils de RV mis en place. Pour traiter de cette question, la configuration informatique minimale requise pourrait être spécifiée dans la liste des matériels à avoir pour l'entrée en P2, au même titre que les autres fournitures pour les travaux pratiques. Un équipement personnel informatique convenable est devenu une chose assez courante et incontournable dans l'enseignement supérieur de façon générale. On retrouve là aussi tout l'intérêt de permettre certaines économies de matériels et de consommables pour les étudiants (rotatifs, fraises, dents en résine...) afin de ne pas répercuter sur eux des frais supplémentaires par rapport à l'organisation préexistante.

Autre mesure facilitatrice pouvant être étudiée : prévoir une salle au sein de l'université avec des ordinateurs adaptés et accessibles aux étudiants. Un système de priorisation pourrait être imaginé en faveur des étudiants dont les ressources ne permettraient pas un équipement personnel adéquat. Ces moyens informatiques pourraient idéalement faire l'objet d'une mutualisation au sein des campus universitaires de la ville.

3.5 Analyse des opportunités et perspectives

3.5.1 Ce que recommande la Haute Autorité de Santé

Dans son rapport intitulé « *Simulation en santé : état des lieux et perspectives de développement* » [8], la HAS préconise dix actions pour le développement structuré de la simulation dans le milieu de la santé, avec à la clé l'assurance d'avancées significatives sur la qualité et la sécurité des soins. Dans l'extrait de ces recommandations ci-dessous, nous avons fait apparaître en gras les éléments qui nous semblaient les plus importants :

Recommandation 1 :

*La formation par les méthodes de simulation en santé doit être intégrée dans tous les programmes d'enseignement des professionnels de santé à toutes les étapes de leur cursus (initial et continu). Un **objectif éthique** devrait être **prioritaire** : « **jamais la première fois sur le patient** » ;*

[...]

Recommandation 3 :

*Une **politique nationale** doit permettre à la formation par la simulation d'être **valorisée** et **dotée de manière adaptée** ;*

Recommandation 4 :

*La formation initiale et continue par la simulation doit faire l'objet de **coopérations entre les universités et les structures de soins** ou les **instituts de formation** (publics ou privés) ;*

[...]

Recommandation 6 :

Chaque société savante doit identifier des **programmes de formation** par la **simulation adaptés aux priorités** de leur discipline ;

Recommandation 7 :

L'ensemble des **ressources** doit faire l'objet d'une **mutualisation** selon des critères validés (plates-formes équipées accessibles, banque de scénarios, programmes de DPC, etc.) ;

[...]

Recommandation 9 :

La simulation peut être utilisée comme un **outil de validation des compétences** (ou de **transfert de compétences**) des professionnels au sein de structures « certifiées » ;

Recommandation 10 :

Les **travaux de recherche** sur la simulation en santé doivent faire l'objet d'une méthodologie rigoureuse et d'une **collaboration en réseau**.

Notons qu'il est question ici de simulation au sens large, et pas uniquement de sa part numérique, l'objectif n'étant pas de privilégier une technologie plutôt qu'une autre. Notons avant tout que la HAS insiste tout spécialement sur la nécessité d'avancer sur les champs de la « *collaboration en réseaux* », de la « *mutualisation des ressources* », de la « *gestion des priorités* ».

En complément de son rapport, la HAS joint des guides méthodologiques pour apporter des outils concrets de mises en œuvre de ses recommandations. Dans son guide « *Simulation en santé et gestion des risques* » [34], elle s'adresse clairement aux décideurs des établissements de santé pour s'engager sur les actions suivantes :

*Au niveau stratégique, et plus particulièrement en établissement de santé ou médico-social, le **top management** (direction générale, CME, direction des soins, coordination de la gestion des risques, etc.) doit être impliqué afin d'impulser une démarche de gestion des risques et inscrire la **simulation comme priorité institutionnelle, attribuer les ressources nécessaires** et promouvoir les démarches **en équipe et interprofessionnelles**, [...] **partager leurs bases de données d'ELIAS** et être force de propositions pour des programmes de simulation en lien avec la réalité de terrain.*

Pour converger vers un même objectif d'amélioration de la qualité des soins et de l'enseignement dans le milieu de la santé, notamment en optimisant les moyens et ressources des différentes structures concernées, la HAS liste les partenariats possibles :

• **Partenariats avec les universités et les instituts :**

- formation initiale ;
- formations continues diplômantes ;
- contribution à l'enseignement universitaire initial ou continu et à la recherche ;

- **Partenariats avec les établissements de santé :**
 - mise à disposition de ressources matérielles ou humaines ;
 - délocalisation possible de formations au sein de ces établissements ;
- **Partenariats avec des structures de formation** (publiques ou privées, fédération, URPS, organismes agréés) :
 - contribution à la mise en œuvre de programmes de simulation ;
- **Partenariats avec des centres de formation par la simulation :**
 - partage de programmes de simulation ;
 - délocalisation de formation ;
 - labellisation ;
 - partage de ressources de formateurs ;
 - homogénéisation des pratiques et actualisation des connaissances ;
- **Partenariats avec des financeurs** (dans le respect des règles déontologiques et d'indépendance, notamment vis-à-vis des conflits d'intérêt) ;
- **Partenariats avec les conseils nationaux professionnels ;**
- **Partenariats avec les associations de patients.**

Dans son « *guide des bonnes pratiques de simulation* » [39], la HAS suggère enfin de s'organiser sous la forme de « *plates-formes mutualisées de simulation* », selon un modèle illustré par la figure ci-après.

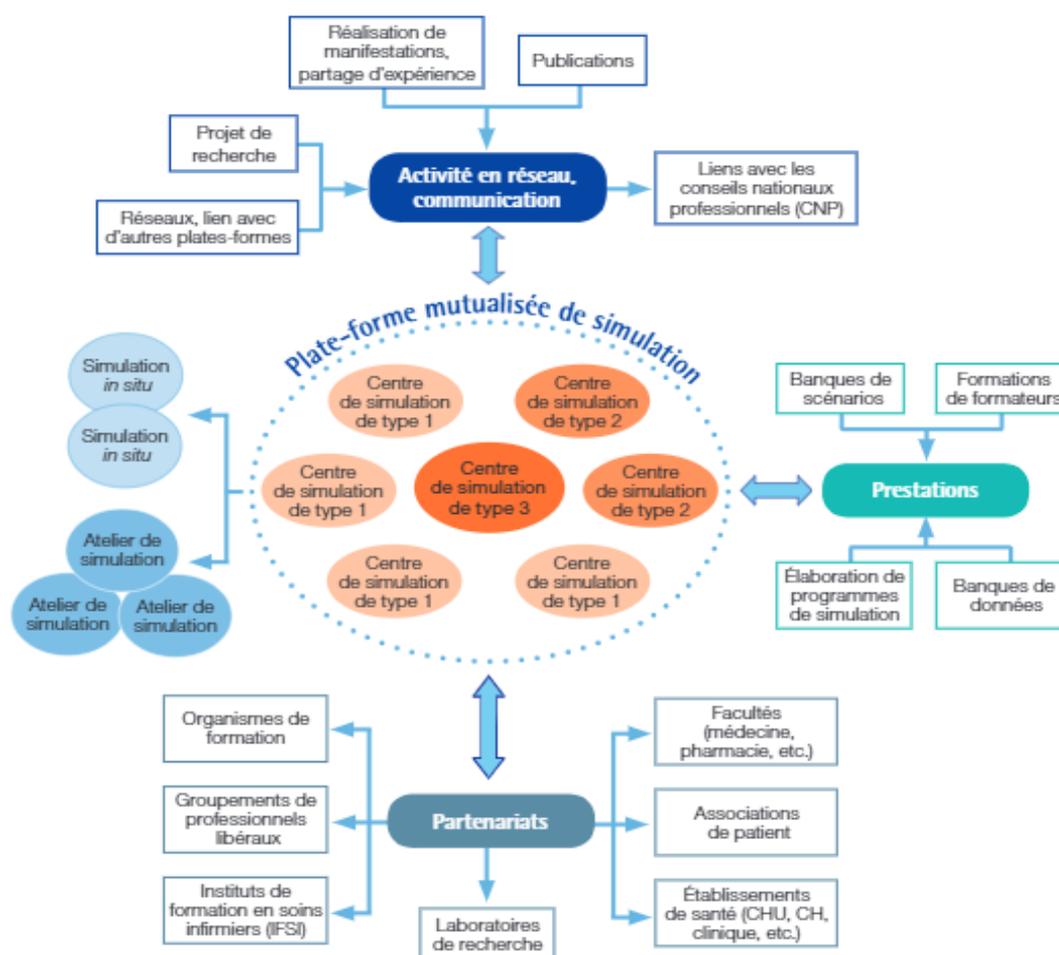


Figure 23 : Exemple de plate-forme mutualisée de simulation [39].

Ces plate-formes s'articulent en un ensemble d'entités qui mettent à la disposition des « promoteurs » leur expérience et leurs moyens techniques, méthodologiques et humains pour la mise en œuvre de programmes de simulation. Elles peuvent être physiques, virtuelles ou hybrides.

Les missions, interactions, prestations et champs d'action des différentes entités sont définies précisément au travers de conventions signées par chaque partie.

Parmi les nombreuses missions et prestations pouvant relever des plateformes mutualisées de simulation citons les suivantes :

- élaborer et décliner des programmes de simulation ;
- réaliser ou mettre à disposition des outils et supports de formation ;
- apporter une expertise méthodologique en matière de mise en place d'infrastructures de simulation ;
- mettre à disposition des équipements de simulation spécifiques (mannequin haute-fidélité, casques de RV, etc.) ;
- piloter des programmes de recherche, en lien avec les partenaires ;
- faire référence pour certaines techniques de simulation ;
- développer et mutualiser des bibliothèques de scénarii ;
- diffuser des programmes de simulation spécifiques sur plusieurs infrastructures ;
- réaliser des retours d'expérience et partages d'expérience ;
- mettre ces supports à disposition en ligne (en accès publiques ou privés) ;
- former et accréditer des formateurs en simulation ;
- produire des outils d'évaluation et de benchmarking ;
- tester des nouveaux équipements ou environnements de simulation ;
- réaliser des actions de communication locales, nationales et internationales (publications, congrès, etc.) ;
- créer des liens avec les autres plates-formes de simulation et les sociétés savantes nationales et internationales ;

3.5.2 Ce qu'observe la Haute Autorité de Santé

Dans sa collecte des bonnes pratiques en matières de simulation en santé, la HAS met en avant les observations suivantes : aux États-Unis, la simulation est très utilisée et son champ d'application est plutôt diversifié [8]. En effet, elle est fréquemment employée pour former les personnels de santé à l'utilisation de nouveaux matériels ou de nouvelles techniques, en amont de leur introduction en clinique. La simulation est aussi très employée pour la recherche dans le domaine de l'enseignement en santé, ainsi que dans celui des facteurs humains et des compétences non techniques telles que la communication et le travail en équipe interprofessionnelle [58]. Un autre axe de développement important est celui de la certification et la recertification des professionnels de santé (obtention ou renouvellement périodique de l'autorisation d'exercice). Par exemple, la recertification des anesthésistes passe obligatoirement par une séance de formation par simulation, même s'il s'agit pour l'instant d'une évaluation formative et non sommative. Les professions médico-chirurgicales bénéficient en outre de réductions significatives de leurs primes d'assurance dès lors qu'ils justifient de formation sur simulateurs.

Les programmes et centres de simulation sont majoritairement financés par des fonds publics, même si la part des centres privés est en augmentation ces dernières années. Le modèle économique des centres publics repose sur le principe d'autofinancement grâce aux formations, et notamment les certifications, mais également aux donations et à la recherche.

À noter qu'aux États-Unis, certains centres de simulation disposent de moyens mobiles de formation, avec certaines sessions animées dans un véhicule spécifiquement équipé et adapté [8]. Ces pratiques permettent d'étendre leur rayonnement géographique et optimiser l'utilisation de leurs ressources.

En Europe, les centres étudiés sont majoritairement publics et rattachés aux hôpitaux universitaires. Tous dispensent des enseignements de formation initiale et continue. La priorité est donnée à la formation professionnelle à destination des personnels hospitaliers et des professionnels extérieurs au centre de simulation.

En matière de recherche, la majorité de ces centres sont très actifs avec des publications spécifiquement axées sur la formation par la simulation. L'attractivité et le rayonnement sont essentiellement locaux et régionaux, et plus rarement de dimension internationale incluant des liens avec des universités étrangères.

Ils disposent majoritairement (un peu plus de deux tiers des centres), d'une politique de communication, au moyen d'internet, de plaquettes, ou de leurs propres réseaux de diffusion [8].

Les principaux financeurs sont les régions, les centres hospitaliers, et les fonds privés de l'industrie, notamment pharmaceutique. Ils développent de nouvelles sources d'autofinancement. Il est intéressant de noter que depuis quelques années de nouvelles formations universitaires diplômantes voient le jour (Tableau 7). Elles s'adressent aux professionnels de santé médicaux et paramédicaux, et même plus largement, à d'autres professions, telles que pompiers, ambulanciers, secouristes, policiers, industriels, formateurs [8]. Parmi ces diplômés, certains sont dédiés à l'activité de simulation et permettent de former les formateurs [39].

Tableau 7 : Exemples de formations diplômantes utilisant la simulation, source HAS.

Intitulé du diplôme	Modalité de formation par la simulation
DU Psycho-sexologie (Paris Descartes)	Simulation de consultation : 6 séances de 3 heures
DU Français médical (Lyon 1)	Simulation d'un interrogatoire de patient
DU Pratiques chirurgicales en cancérologie (Lyon 1)	Simulation de comités de décision thérapeutique pluridisciplinaire
DU Prise en charge des traumatismes sévères (Lyon 1)	Atelier de simulation de prise en charge pré-hospitalière, transport et accueil et traitement hospitaliers (adulte, enfant)
DU Régulation médicale dans un centre de réception et de régulation des appels (CRRRA) du SAMU (Lyon 1)	Simulation d'appels téléphoniques à la régulation en ateliers
DU Gestion des risques dans la prise en charge des patients en établissement de santé (UFR de médecine d'Angers)	3 modules utilisant la simulation haute-fidélité de situations cliniques en anesthésie réanimation obstétrique, prise en charge thérapeutique
DIU de perfectionnement en anesthésie pédiatrique (UFR Angers, Rennes, Nantes, Tours)	1 module : séances de simulation : <ul style="list-style-type: none"> • simulation et anesthésie pédiatrique ; • présentation du matériel ; • 4 scénarios d'anesthésie pédiatrique sur mannequins haute-fidélité.
DU Simulation pour l'apprentissage des sciences de la santé (UFR de médecine et des sciences de la santé de Brest)	Formation de formateur à la simulation
DU Formateur à l'enseignement sur simulateur, (Paris Descartes)	Formation de formateur à la simulation

Au terme de son rapport et de ses observations, la HAS conclut que, pour la majorité des centres, l'investissement initial matériel et humain est approprié, et qu'il existe un important potentiel de financement issu d'investisseurs privés et de la communauté européenne [39].

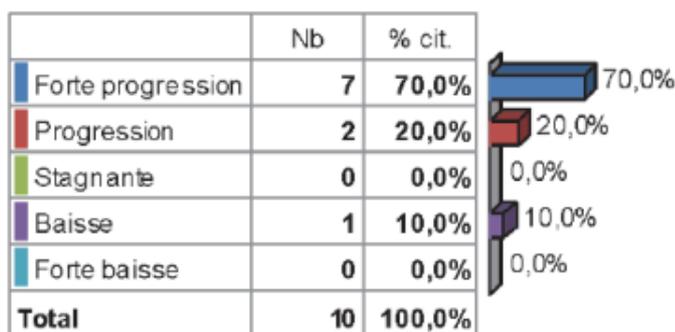


Figure 24 : Progressions, sur 3 ans, de l'activité pour 10 centres de formation audités, source HAS.

La figure ci-dessus donne une bonne indication de l'espérance de progression des activités de formation dans le temps, y compris sur le court terme (trois ans), et donc la probabilité pour un centre mutualisé de simulation d'être viable financièrement. Les taux de progression constatés et remontés par ces centres sont plutôt positifs, voire très positifs. Aucun cas constaté de forte baisse d'activité. Ces résultats, même s'ils ne tiennent qu'aux centres ayant fait la démarche de communiquer leurs données de façon exploitable, doivent nous donner confiance dans notre capacité à mener de nouveaux projets pour répondre aux défis auxquels nous faisons face.

3.5.3 Exemples de projets porteurs en France

Les exemples de programmes de formation recensés par la HAS remontent à 2012 et portent essentiellement sur des techniques de simulation conventionnelles non numériques. Depuis, la part du numérique et de la RV dans les techniques de formation est en très nette progression et tend à se généraliser, en particulier au sein des pôles d'excellence, avec à la clé de très bons résultats.

Citons par exemple le **HLV** (Hôpital Virtuel de Lorraine), un programme innovant destiné aux professionnels de santé et regroupant les facultés de médecine, d'odontologie, de pharmacie, de maïeutique, et des sciences du sport de l'Université de Lorraine.

La simulation y est omniprésente dans les processus de formation qui remplacent la rencontre avec de vrais patients par des modèles artificiels (patients virtuels ou mannequins) ou anatomiques (dépouilles) ou encore par des jeux sérieux. L'objectif est de recréer des environnements réalistes pour des scénarii d'apprentissage techniques sur les thématiques suivantes :

- entraînements répétés aux procédures diagnostiques et thérapeutiques ;
- prise de décision pour professionnel de santé ou équipe pluridisciplinaire ;
- préparation d'interventions complexes en lien avec de vrais cas cliniques.

L'HVL en quelques chiffres [59] :

- 150 formateurs, plus de 15 formations diplômantes (DU et DIU),
20 000 heures de formation par an, 200 scénarii de formation

- Montant total du projet : 8 855 014 €

- Montants des aides :

Union Européenne	4 084 011 €
État	1 500 000 €
Région Grand Est	1 500 000 €

D'autres partenaires financiers se sont aussi joints au projet :

ARS, Ligue contre le cancer, Banque Populaire, CASDEN (banque coopérative de la fonction publique, historiquement Caisse d'Aide Sociale de l'Éducation Nationale), ACEF (Association pour le Crédit et l'Épargne des Fonctionnaires et assimilés).

Autre projet qui puisse être cité en exemple, à proximité immédiate de la faculté de chirurgie dentaire de Lille : le centre de simulation en santé **PRESAGE** (Plateforme de Recherche et d'Enseignement par la Simulation pour l'Apprentissage des Attitudes et des GEstes) [60]. Ce département de la faculté de médecine de Lille a pour mission de former les étudiants et les professionnels de santé par le biais d'une immersion dans un environnement hospitalier recréé où les mannequins, haute et basse technicité, prennent la place des patients.

Il dispose d'infrastructures sur 2 200m² comprenant 8 chambres d'hôpital reconstituées (Figure 25), 3 cabinets de consultation, 1 salle d'entretien familles, 9 salles de débriefing équipées d'un système de retransmission audio-vidéo, et 4 salles dédiées à l'apprentissage des gestes techniques. Ces salles de simulation sont équipées de plus de 500 simulateurs de 80 types différents. Parmi ces mannequins procéduraux, 13 sont des mannequins complexes, dont un mannequin de très haute technicité unique en France, auxquels s'ajoutent 7 mannequins d'obstétrique et de pédiatrie, et 5 mannequins adultes. L'équipement comprend également 7 simulateurs numériques pour l'apprentissage de l'endoscopie broncho-digestive, de l'échocardiographie, de l'échographie obstétricale et de l'otoscopie.



Figure 25 : Chambre d'hôpital reconstituée avec mannequin haute technicité, centre PRESAGE de Lille.

Le centre de simulation s'appuie également sur les autres infrastructures de la faculté de médecine : amphithéâtres et salle de congrès, laboratoire d'anatomie et laboratoire de recherche en expérimentation animale.

L'activité du centre s'adresse aux étudiants en médecine évidemment, mais accueille également les élèves des écoles de soins infirmiers (IFSI), de puériculture, d'aides-soignants (IFAS) et de sages-femmes ainsi que les médecins et les personnels soignants du CHU et des établissements partenaires de formation.

PRESAGE propose de nombreux programmes en formation continue pour les professions paramédicales et les médecins en exercice de diverses spécialités (médecine générale, chirurgie, gynécologie-obstétrique, anesthésie, réanimation, pneumologie, pédiatrie, cardiologie, etc.).

Par an, ce sont près de 7 500 apprenants qui ont ainsi été formés au centre de simulation.

Les infrastructures sont également ouvertes aux équipes de recherche et aux industriels du secteur de la santé pour :

- développer, tester et évaluer de nouveaux dispositifs médicaux ;
- mener des travaux de recherche en pédagogie ;
- développer de nouveaux outils pédagogiques.

La coordination du centre est assurée par le Professeur Gilles Lebuffe, PU-PH anesthésiste-réanimateur, assisté du Docteur Mehdi El Amrani, MCU-PH en chirurgie, et du Docteur Sébastien Sanges, interne en médecine. Ils sont en lien avec une équipe permanente de cinq agents en charge de la gestion administrative et du bon déroulement des formations. Cette équipe s'appuie également sur l'expertise de nombreux

professionnels de santé issus du CHU de Lille et tous formés aux spécificités de l'enseignement par la simulation.

3.5.4 Perspectives de partenariats techniques et financiers

Sur la base des exemples détaillés plus haut, on entrevoit tout un ensemble d'opportunités pour la faculté de chirurgie dentaire de Lille en terme de partenariats (liste non exhaustive).

Les perspectives de partenariats techniques :

⇒ Partenariat au sein de l'université de Lille : mutualisation d'infrastructures, d'équipements, de compétences, et de contenus, comme des banques d'exercices et de patients virtualisés, en lien avec les autres disciplines de santé, médecine, pharmacie, maïeutique, en prenant part aux programmes du centre PRESAGE ;

⇒ Partenariats avec d'autres universités de santé :

Avec l'aide du Dr. Jérôme Vandomme, MCU-PH, chargé de mission « *nouvelles technologies* » à la faculté de chirurgie dentaire de Lille, et correspondant lillois du groupe de travail national « *simulation en odontologie* », nous avons adressé un questionnaire aux autres membres du GT. Cette démarche envers les différentes facultés de chirurgie dentaire françaises avait plusieurs objectifs :

- Dresser un premier bilan des actions pédagogiques, engagées ou à venir, basées sur la simulation, notamment numérique ;
- Lancer un échange sur les programmes de formation par la simulation, et les moyens humains et matériels alloués en rapport aux effectifs étudiants ;
- Collecter les avis et retours d'expérience de chaque unité vis-à-vis des équipements utilisés ;
- Collecter les éventuelles suggestions et aspirations de ces correspondants dans le domaine de la simulation ;

Quatre représentants du GT ont répondu. Rattachés aux universités de Montpellier, de Lorraine, de Nantes et de Paris, ils nous ont fait part de leur souhait de travailler ensemble sur les champs suivants : « *Développements d'exercices communs, et partages d'expérience* », « *uniformisation, mutualisation* », « *Mise en commun de moyens pédagogiques, appels d'offre mutualisés, stratégie de développement nationale* », « *aider à monter un centre de simulation en odontologie* ».

Les universités de Paris, Nantes et Nancy sont très actives dans le domaine de la simulation, notamment virtuelle. L'université de Lorraine avec le HLV présente l'avantage supplémentaire de travailler sur des matériels identiques aux nôtres avec 23 simulateurs VirtEasy® et 110 postes Kavo® (ainsi que 10 Simodont® et 5 Surewash®). C'est le cas de figure idéal pour une mutualisation efficace de programmes de formation et d'exercices, de partages d'expérience, et de travaux de recherche en commun.

L'augmentation des effectifs étudiants en études de santé, perçue de prime abord comme pénalisante, peut alors être utilisée comme un atout : des actions collectives regroupant le corps professoral, les

internes, les moniteurs et les thésards, peuvent constituer une puissante force de travail pour mener des travaux de recherche coordonnés, par exemple sur les thématiques de la formation par la simulation. D'où l'intérêt d'ailleurs de disposer d'un grand centre de simulation, qui peut alléger considérablement les protocoles d'étude de cohorte dans la mesure où ils ne nécessitent pas l'inclusion de patients [60].

⇒ Partenariats avec d'autres campus universitaires notamment scientifiques : par exemple le Laval Virtual Center, pôle d'excellence spécialisé depuis 1999 dans les nouvelles technologies immersives, en lien avec l'ENSAM (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers), organisateur d'expositions annuelles réelles et virtuelles, avec un rayonnement international.

Simon Richir, co-fondateur de Laval Virtual, et Professeur d'Université à l'ENSAM, que nous avons contacté en visioconférence, s'est montré intéressé par la perspective de mener des projets en commun dans le domaine de la formation en RV/RA ;

⇒ Partenariats avec des acteurs de l'industrie comme par exemple :

- Les entreprises HRV et TwinMedical comme vu précédemment, développeurs et installateurs des simulateurs dentaires VirtEasy® et d'autres équipements et logiciels de VR. Leurs directions respectives se sont montrées intéressées à l'idée de projets en commun, y compris des prêts d'équipements pour essai, tel que le UniSim®, simulateur VR haptique compact connectable à distance ;
- Renforcer et développer le partenariat avec l'entreprise CDinformatique, distributrice d'équipements informatiques et d'imagerie 3D, qui met déjà un CBCT à disposition de la faculté de Lille ;
- Renforcer et développer le partenariat avec l'entreprise Dentalhitec, qui met à disposition des systèmes d'anesthésie avec injection contrôlée électroniquement (Sleeper One®, Soan®, QuickSleeper®) auprès de l'unité fonctionnelle d'odontologie pédiatrique du service d'odontologie du CHU de Lille, et anime des travaux pratiques sur tête fantôme en antenne à Boulogne sur Mer.

⇒ Partenariats avec des organismes de formation publics ou privés :

La mise en application du DPC (Développement Professionnel Continu) va avoir pour effet d'augmenter de façon importante les besoins en formation des professionnels de santé. En effet, depuis 2021, le Conseil de l'Ordre des Chirurgiens-Dentistes procède aux premiers contrôles de la bonne intégration du DPC par les praticiens. Ces derniers sont tenus de participer chaque année à un programme de formation (congrès, conférences, e-Learning, enseignement postuniversitaire diplômant ou non, etc.) Cette obligation renvoie à la loi de réforme de l'Hôpital et relative aux Patients, à la Santé et aux Territoires (HPST) de 2009. A défaut, le chirurgien-dentiste est susceptible d'être considéré en « insuffisance professionnelle ». Les organismes de formation doivent être habilités par l'OGDPC et être en conformité avec les recommandations de la HAS [61].

Les universités ont ainsi un rôle déterminant à jouer pour répondre à ces besoins accrus en formation et développer par la même occasion leur rayonnement et leurs activités de formation à l'externe. Certaines études évoquent même la possibilité d'étendre l'utilité des simulateurs VR à la rééducation des praticiens en incapacité partielle de travail suite à accident [10].

La faculté de chirurgie dentaire de Lille, tout particulièrement, dispose de réels atouts de par ses effectifs et la taille de son centre de simulation, parmi les plus grands d'Europe [5]. Ses enseignants, de par leurs parcours et leur expertise, sont les plus à même d'animer des programmes de formation pour les professions médicales et paramédicales. Ceci va également dans le sens de se placer en appui de ces professionnels dans leur recherche de perfectionnements en réponse à la judiciarisation de leur exercice.

De manière générale, les contextes décrits en paragraphe 1 peuvent être appréhendés et utilisés comme des opportunités de développer nos activités de formations et de recherche. Il est notamment possible d'être davantage acteur de la globalisation et de l'innovation en cours dans l'industrie et l'enseignement, en développant nos partenariats à tous niveaux, et nos actions de communication.

Les perspectives de partenariats financiers à étudier :

- ⇒ **ARS** ;
- ⇒ **L'université** de Lille ;
- ⇒ **La région** Hauts de France ;
- ⇒ **Le programme FEDER**, (Fond Européen de Développement Régional), qui soutient les thématiques suivantes : recherche, développement technologique, innovation, compétitivité, transition bas carbone, adaptation au changement climatique, prévention des risques, formation, emploi [62]. FEDER a notamment financé une bonne partie du projet HVL de l'université de Lorraine ;
- ⇒ **Next Generation EU**, le plan de relance européen voté en 2021 pour la gestion de l'après-COVID-19. D'un montant total de 2018 milliards d'euros sur sept ans, c'est le plus vaste programme jamais financé en Europe. Il vise à soutenir l'écologie, le numérique, la résilience en Europe. Plus de 50 % du plan soutiendra la modernisation par la recherche et l'innovation. Il comporte d'autres volets, RescEU et EU4Health, «L'UE pour la santé», spécifiquement alloués au domaine de la santé, ainsi que REACT-EU et son enveloppe de 50,6 milliards d'euros pour remédier aux conséquences de la crise pandémique [63].

3.5.5 Opportunité de renouvellement du parc existant

Les simulateurs à tête fantôme de la faculté de chirurgie dentaire de Lille sont installés depuis bientôt 15 ans, ce qui dépasse d'ores et déjà leur durée de vie initialement prévue. De nouvelles unités ont été ajoutées pour suivre le nombre grandissant d'étudiants à former, mais la majorité des simulateurs d'origine sont encore en fonctionnement. De multiples réparations ont déjà été effectuées et la question se posera à moyen terme de continuer à prolonger la durée de vie du parc de simulateurs

existant ou de le renouveler, ne serait-ce qu'en partie, avec des modèles plus récents répondant mieux aux dernières normes sanitaires, énergétiques, acoustiques, ou pour suivre l'accroissement du nombre d'étudiants par promotion.

3.5.6 Perspectives d'évolutions technologiques

Le niveau de réalisme des simulateurs actuels présente encore certaines imperfections, notamment en matière d'interaction, de stéréovision, de résolution graphique, de retour de force, ou encore d'évaluation des résultats. Pour continuer à tendre vers la meilleure fidélité possible, voici ci-après des perspectives d'évolutions technologiques [16].

Une meilleure connectivité avec la 5G

La partie calculs des systèmes virtuels actuels est prise en charge généralement au niveau du serveur. Le déploiement de la 5G appliquée à ces systèmes permettrait une nette augmentation de la bande passante et de la vitesse de transmission des données [64] entre le serveur et les périphériques d'affichage de chaque poste. Le rendu visuel et tactile serait plus fluide et confortable pour les utilisateurs [65,66]. De même, la 5G pourrait favoriser la mise en place de réseaux pédagogiques en visioconférence ou en RV, entre différents départements d'une université, voire entre différentes universités distantes géographiquement. Des connexions synchrones collectives seraient possibles pour diffuser par exemple des démonstrations des plus grands experts d'une discipline.

Analyse visuelle de la formation avec les mégadonnées

Les mégadonnées (ou Big Data en anglais) appliquées à l'enseignement proposent une méthode d'analyse visuelle [67] pour un suivi plus fin et intuitif de l'apprentissage des étudiants par les enseignants. Cette méthode statistique passe par l'intégration et l'analyse des données éducatives. Cette technologie est déjà appliquée à l'analyse pédagogique des Mooc [68] et de l'assimilation des cours en médecine [67]. En odontologie, la collecte des données de procédures simulées permettrait leur comparaison à des procédures idéales. De là, un système d'évaluation scientifique pourrait être mis au point. Sur le plan pédagogique, l'intérêt serait de doter les enseignants d'outils d'analyse des progrès faits par les étudiants, et d'être plus en anticipation d'éventuelles difficultés collectives ou individuelles sur une thématique ou une méthode.

Amélioration de la simulation de retour d'effort par Deep Learning

Le Deep Learning, ou apprentissage en profondeur, permet d'élaborer plus fidèlement les modèles haptiques des objets à partir de leurs images [69]. Sur la base d'une masse de données collectées, cette technologie permet de paramétrer finement les retours de force à générer au plus près des propriétés physiques réelles sans avoir à ajuster manuellement ces paramétrages. Les nuances et les variations de retour de force pour les différents tissus bucco-dentaires pourraient, elles aussi, être améliorées. Déjà assez largement utilisé dans l'analyse et la modélisation d'images médicales [70], cette méthode est encore source de progrès importants pour mailler et exploiter des clichés d'imagerie médicales 3D [71] en vue

de créer facilement des modèles virtuels de cavités buccales pour des travaux de simulation proche de la réalité clinique.

Une évolution vers des simulateurs RV multi-sensoriels

Certains simulateurs en cours de développement et d'essais cliniques au sein d'université de santé, visent à augmenter significativement le nombre de variables physiologiques simulées, avec une vaste gamme de signaux multi-sensoriels [72] : signaux visuels (afflux sanguin, expressions faciales, marbrures...), signaux auditifs (réponses verbales, battements cardiaques, toux...) et signaux tactiles (température, pouls...). Les premiers retours des universitaires testeurs sont mitigés mais encourageants.

En synthèse, les technologies numériques en santé nous réservent encore de nombreuses innovations prometteuses. Toutefois, hormis pour des travaux de recherche ou de tests, la raison impose d'orienter ses choix d'équipements sur des matériels qui ont fait leurs preuves avec un recul garantissant un bon niveau de fiabilité et qui sont financièrement plus accessibles pour équiper un centre de simulation de grande envergure.

Conclusion

L'odontologie, comme d'autres secteurs de la santé, fait face depuis quelques années à de nouveaux enjeux et à une mise en tension de son système d'enseignement. Ces enjeux sont d'origines multifactorielles. Entrent en jeu en effet des facteurs démographiques et économiques, avec des étudiants de plus en plus nombreux à former et des ressources formatives en stagnation voire en diminution. Mais également des facteurs sociétaux et juridiques, avec des évolutions culturelles nettement plus orientées sur l'équité, l'intolérance aux écarts, l'individualisation, l'accessibilité à la demande, et la modernité technologique. Plus récemment, avec les événements pandémiques de la Covid-19, des facteurs sanitaires ont ajouté à la complexité du contexte universitaire en santé.

A l'échelle mondiale, les établissements de formation en odontologie font évoluer en conséquence leurs méthodologies et leurs équipements pédagogiques pour maintenir voire améliorer la qualité de leur enseignement. Pour la composante théorique, on assiste notamment au développement des diffusions de cours à distance synchrone ou asynchrone, plutôt que les formats traditionnels de cours magistraux en présentiel synchrone. Pour la composante pratique, essentiellement basée sur la simulation, la tendance est à l'essor des technologies numériques et tout particulièrement des simulateurs de réalité virtuelle haptiques.

Le présent écrit fait référence à des retours d'expériences universitaires ainsi qu'aux études disponibles dans la littérature scientifique sur le sujet. Il met en évidence un certain nombre d'avantages de ces simulateurs numériques. Le premier constat notable est que, de l'avis assez unanime des publications, les simulateurs VR haptiques sont plus efficaces pour la formation des étudiants que les simulateurs physiques conventionnels. Ils améliorent la rapidité d'acquisition des compétences psychomotrices essentielles aux débutants, pour une qualité finale des travaux équivalente voire meilleure. Ils réduisent le temps de supervision instructeur nécessaire par étudiant. Ce temps peut alors être mis à profit pour encadrer davantage d'étudiants, ou pour un suivi plus global des courbes d'apprentissage ou encore pour une meilleure anticipation des points de difficulté. Les simulateurs numériques sont aussi synonymes de suppression des coûts de fonctionnement et de sécurisation des travaux pratiques avec la dématérialisation des instruments manuels et rotatifs et l'absence de consommables. Ils apportent de vrais gains en objectivité et cohérence des retours informatisés faits aux étudiants qui confortent leur auto-évaluation et favorisent leur progression. Ils apportent en outre davantage d'évolutivité, d'interactivité et d'accessibilité que les modèles physiques, et constituent un précieux levier de promotion de l'excellence pour une université. Notons cependant que ces atouts sont valables spécifiquement pour deux modèles de simulateurs numériques, le Simodont® et le VirtEasy®, qui se distinguent des autres modèles par le nombre de leurs options et possibilités particulièrement adaptées à la formation des étudiants en chirurgie dentaire. Ces deux simulateurs, le VirtEasy® en tête, apportent

en fait des réponses concrètes à l'ensemble des enjeux décrits en préambule. De plus, à force de développements et d'améliorations, ils ont résolu plusieurs des éléments négatifs couramment pointés du doigt à propos de cette technologie : ils ont atteint un excellent niveau de fiabilité des supports hardware et software, ainsi qu'un très bon niveau de rendu graphique, tactile et immersif pour une expérience transposable à la réalité clinique.

Ces deux simulateurs, aussi aboutis qu'ils soient, présentent toutefois certaines limites. En premier lieu, leur coût à l'acquisition est notablement supérieur et doit être appréhendé comme un investissement à amortir sur le moyen-long terme. Un facteur clé de la réussite sera d'ailleurs la bonne anticipation des délais de prise de décision et d'obtention des financements. Comme le souligne la HAS, les sources de financement et de collaborations sont nombreuses et méritent toutes d'être étudiées. Nous en citons plusieurs exemples viables dans ce mémoire. Deuxième point, pour valider l'usage des modules d'évaluation informatisée dans le cadre d'examens pratiques, il serait souhaitable de procéder à des études complémentaires. Enfin, dernier point, sans doute le plus important : les simulateurs numériques ne permettent pas de suppléer intégralement les simulateurs physiques, compte tenu de certaines procédures non simulées virtuellement à ce jour. Sur ce point, il faut avoir à l'esprit que l'efficacité des techniques de simulation dépend de l'usage qui en est fait et que le degré de fidélité ne fait pas tout. La conception de formations efficaces et de qualité se fait en tirant parti de toutes les ressources formatives et tous les types de simulations disponibles, en incluant les solutions innovantes telles que les autres formes combinées de réalité virtuelle et augmentée, les environnements de travail 3D, ou encore les Serious Games. L'élaboration du programme de formation reste le point prépondérant et requiert un investissement particulier des équipes pédagogiques, a minima au cours des étapes de lancement de nouveaux projets de simulation. L'expérience montre que ce travail préalable est essentiel, et il est impératif que le temps nécessaire soit pesé et aménagé dans les agendas des enseignants concernés. Il importe également de choisir avec soin les entreprises conceptrices et installatrices des équipements retenus pour la simulation, en étudiant leur expérience, leur réactivité et leur capacité à former et accompagner les personnels encadrants. Retenons en synthèse que dans le contexte actuel de l'enseignement supérieur, dans une société où rationalisation et immédiateté occupent une place centrale, le recours à la simulation numérique comme vecteur pédagogique apparaît comme une solution viable, fiable et efficace, sans pour autant être omnipotente. Comme l'explique l'OCDE dans son rapport de 2015 [73] : *« ce n'est pas tant l'intégration du numérique en classe qui améliore les performances scolaires que l'évolution des pratiques pédagogiques. Les pays ayant obtenu les meilleurs résultats d'enseignement avec le numérique ont développé largement le travail en petits groupes, l'apprentissage par projet et l'enseignement personnalisé et adapté aux compétences de chacun. Déployer le numérique sur des pédagogies du siècle passé n'a porté ses fruits dans aucun des pays qui l'a tenté »*.

Liste des tables

Tableau 1 : EPI recommandés pour la prise en charge de patient suspect/confirmé COVID-19.....	24
Tableau 2 : Description des différentes techniques de simulation, d'après [8].	30
Tableau 3 : Répartition moyenne des sources de financement d'après une étude HAS [15].....	37
Tableau 4 : Outil d'aide au choix d'une technique de simulation selon le programme visé, HAS [34].	48
Tableau 5 : Synthèse des avantages et inconvénients entre simulateurs physiques et virtuels.....	50
Tableau 6 : Caractéristiques de différents simulateurs VR haptiques dentaires, d'après [16,29].	55
Tableau 7 : Exemples de formations diplômantes utilisant la simulation, source HAS.....	70

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du numéris clausus en santé en France depuis 1980, source DREES.....	17
Figure 2 : Pyramides des âges des chirurgiens-dentistes, en 2012 et 2021, source DREES.....	18
Figure 3 : Répartition des formateurs selon leur profil, source HAS.....	19
Figure 4 : Evolution des dépenses et effectifs de l'enseignement supérieur en France, d'après [3].	20
Figure 5 : Recommandations du Haut Conseil de la Santé Publique en date du 18 janvier 2021.....	22
Figure 6 : Protocole Covid-19 pour les soins dentaires – source ONCD 13/03/2020.	23
Figure 7 : Casque Oculus® et ses accessoires d'immersion virtuelle 3D.	28
Figure 8 : Complete Anatomy® application d'anatomie en réalité augmentée avec ARKit®	29
Figure 9 : Les différents types de simulation médicale [8].....	30
Figure 10 : Un croquis de la première tête fantôme conçue par Oswald Fergus en 1894.	33
Figure 11 : Un simulateur à tête fantôme moderne.	33
Figure 12 : Etablissements équipés de simulateurs VirtEasy® à travers le monde en 2022.	45
Figure 13 : Simulateur DentSim®	51
Figure 14 : Simulateur PerioSim®, d'après [47].....	52
Figure 15 : Simulateur dentaire Simodont®.....	53
Figure 16 : Simulateurs VirtEasy®	54
Figure 17 : Micro simulateur UniSim®, à gauche en version transportable, à droite en version fixe.	58
Figure 18 : Bibliothèque de simulations mutualisable couvrant différentes disciplines de santé.....	58
Figure 19 : Entraînement LabForSims en immersion 3D pour le diagnostic et la prise de décision thérapeutique.	59
Figure 20 : Immersion 3D "Les agents virtuels expressifs" pour l'aide à la prise de décision thérapeutique [23].	60
Figure 21 : Immersion 3D Axon Training® pour la prise en charge de pathologies mentales.	60
Figure 22 : À gauche le système Augment®, à droite la visualisation 3D augmentée d'un entraînement.	61
Figure 23 : Exemple de plate-forme mutualisée de simulation [39].....	67
Figure 24 : Progressions, sur 3 ans, de l'activité pour 10 centres de formation audités, source HAS.	70
Figure 25 : Chambre d'hôpital reconstituée avec mannequin haute technicité, 72	

Références bibliographiques

- [1] Huang T-K, Yang C-H, Hsieh Y-H, Wang J-C, Hung C-C. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *Kaohsiung J Med Sci* 2018;34:243–8. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2018.01.009>.
- [2] Ma santé 2022 : suppression du numerus clausus et rénovation de l'accès aux études de santé. *Enseign-Rech*. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/ma-sante-2022-suppression-du-numerus-clausus-et-renovation-de-l-acces-aux-etudes-de-sante-49091> (accessed March 21, 2022).
- [3] Projet de loi de finances pour 2022 : Enseignement supérieur n.d. http://www.senat.fr/rap/a21-168-52/a21-168-52_mono.html (accessed January 10, 2022).
- [4] Démographie : les chirurgiens-dentistes, une profession qui rajeunit, se féminise et se « salarise ». *Inf Dent* 2021. <https://www.information-dentaire.fr/actualites/demographie-les-chirurgiens-dentistes-une-profession-qui-rajeunit-se-feminise-et-se-salarise/> (accessed March 21, 2022).
- [5] Sfeir Robin. La simulation en réalité virtuelle: une nouvelle approche pédagogique en odontologie / Robin Sfeir ; sous la direction de Maxime Beaurain. Thèse d'exercice Chirurgie dentaire Lille 2018, 2018.
- [6] Les écrans et les jeux vidéo. <https://www.drogues.gouv.fr/comprendre/ce-qu-il-faut-savoir-sur/lexposition-aux-ecrans> (accessed March 13, 2022).
- [7] Perry S, Bridges SM, Burrow MF. A Review of the Use of Simulation in Dental Education. *Simul Healthc* 2015;10:31–7. <https://doi.org/10.1097/SIH.000000000000059>.
- [8] Simulation en santé : état des lieux et perspectives de développement. *Haute Aut Santé*. https://www.has-sante.fr/jcms/c_1173211/fr/simulation-en-sante-etat-des-lieux-et-perspectives-de-developpement (accessed September 23, 2021).
- [9] Joseph D. Impact de la simulation haptique dans l'enseignement en odontologie. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01816937/document>
- [10] Plessas A. Computerized Virtual Reality Simulation in Preclinical Dentistry: Can a Computerized Simulator Replace the Conventional Phantom Heads and Human Instruction? *Simul Healthc* 2017;12:332–8. <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000250>.
- [11] La Lettre. *Ordre Natl Chirugiens-Dent* n.d. <https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/la-lettre/> (accessed April 7, 2022).
- [12] Desai BK. Clinical implications of the COVID-19 pandemic on dental education. *J Dent Educ* 2020;84:512–512. <https://doi.org/10.1002/jdd.12162>.
- [13] Deery C. The COVID-19 pandemic: implications for dental education. *Evid Based Dent* 2020;21:46–7. <https://doi.org/10.1038/s41432-020-0089-3>.

- [14] Litiges croissants... souvent solutionnés à l'amiable. dentaire365 2019. <https://www.dentaire365.fr/actualites/actualites-365/des-litiges-croissants-souvent-solutionnes-a-l-amiable/> (accessed April 7, 2022).
- [15] Octares Editions - Améliorer la pratique professionnelle par la simulation. <https://www.octares.com/formation/106-ameliorer-la-pratique-professionnelle-par-la-simulation.html> (accessed April 7, 2022).
- [16] Li Y, Ye H, Ye F, Liu Y, Lv L, Zhang P, et al. The Current Situation and Future Prospects of Simulators in Dental Education. *J Med Internet Res* 2021;23:e23635. <https://doi.org/10.2196/23635>.
- [17] Notion de jeu sérieux. Éduscol Site Prof Léducation. <https://contrib.eduscol.education.fr/numerique/dossier/apprendre/jeuxseries/notion> (accessed April 7, 2022).
- [18] Reymus M, Fotiadou C, Kessler A, Heck K, Hickel R, Diegritz C. 3D printed replicas for endodontic education. *Int Endod J* 2019;52:123–30. <https://doi.org/10.1111/iej.12964>.
- [19] Hanafi A, Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S. Perception of a modular 3D print model in undergraduate endodontic education. *Int Endod J* 2020;53:1007–16. <https://doi.org/10.1111/iej.13299>.
- [20] Université de Lille, Duthilleul Justine, Robberecht Lieven. Evaluation de deux nouveaux modèles 3D pour l'apprentissage de la réparation des perforations iatrogènes par des étudiants de niveaux d'expérience différents, 2021.
- [21] Knowledge acquisition and cyber sickness : a comparison of VR devices in virtual tours | MM Science Journal. www.mmscience.eu. <https://www.mmscience.eu/journal/issues/june-2015/articles/knowledge-acquisition-and-cyber-sickness-a-comparison-of-vr-devices-in-virtual-tours> (accessed March 14, 2022).
- [22] Escobar-Castillejos D, Noguez J, Neri L, Magana A, Benes B. A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training. *J Med Syst* 2016;40:104. <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0459-8>.
- [23] Keeve E, Girod S, Kikinis R, Girod B. Deformable modeling of facial tissue for craniofacial surgery simulation. *Comput Aided Surg Off J Int Soc Comput Aided Surg* 1998;3:228–38. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0150\(1998\)](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0150(1998)).
- [24] Teschner M, Girod S, Girod B. Direct Computation of Nonlinear Soft-Tissue Deformation.
- [25] Gottlieb R, Lanning SK, Gunsolley JC, Buchanan JA. Faculty impressions of dental students' performance with and without virtual reality simulation. *J Dent Educ* 2011;75:1443–51.
- [26] Tate W, White R. Disinfection of human teeth for educational purposes. *J Dent Educ* 1991;55:583–5. <https://doi.org/10.1002/j.0022-0337.1991.55.9.tb02567.x>.
- [27] Buchanan JA. Use of Simulation Technology in Dental Education. *J Dent Educ* 2001;65:1225–31. <https://doi.org/10.1002/j.0022-0337.2001.65.11.tb03481.x>.

- [28] LeBlanc VR, Urbankova A, Hadavi F, Lichtenthal RM. A preliminary study in using virtual reality to train dental students. *J Dent Educ* 2004;68:378–83.
- [29] Roy E, Bakr MM, George R. The need for virtual reality simulators in dental education: A review. *Saudi Dent J* 2017;29:41–7. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2017.02.001>.
- [30] Jasinevicius TR, Landers M, Nelson S, Urbankova A. An Evaluation of Two Dental Simulation Systems: Virtual Reality versus Contemporary Non-Computer-Assisted. *J Dent Educ* 2004;68:1151–62. <https://doi.org/10.1002/j.0022-0337.2004.68.11.tb03860.x>.
- [31] Gal GB, Weiss EI, Gafni N, Ziv A. Preliminary assessment of faculty and student perception of a haptic virtual reality simulator for training dental manual dexterity. *J Dent Educ* 2011;75:496–504.
- [32] Weeks DL, Kordus RN. Relative frequency of knowledge of performance and motor skill learning. *Res Q Exerc Sport* 1998;69:224–30. <https://doi.org/10.1080/02701367.1998.10607689>.
- [33] Burnett AC, Linden GJ. The reproducibility of the assessment of restorations by dental students and their teachers. *J Dent Educ* 1988;52:568–70.
- [34] Simulation en santé et gestion des risques. Haute Aut Santé. https://www.has-sante.fr/jcms/c_2905932/fr/simulation-en-sante-et-gestion-des-risques (accessed January 11, 2022).
- [35] Zhang B, Li S, Gao S, Hou M, Chen H, He L, et al. Virtual versus jaw simulation in Oral implant education: a randomized controlled trial. *BMC Med Educ* 2020;20:272. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-02152-y>.
- [36] Milburn JA, Khera G, Hornby ST, Malone PSC, Fitzgerald JEF. Introduction, availability and role of simulation in surgical education and training: review of current evidence and recommendations from the Association of Surgeons in Training. *Int J Surg Lond Engl* 2012;10:393–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2012.05.005>.
- [37] Fugill M. Defining the purpose of phantom head. *Eur J Dent Educ Off J Assoc Dent Educ Eur* 2013;17:e1-4. <https://doi.org/10.1111/eje.12008>.
- [38] To Err Is Human: Building a Safer Health System. Washington, D.C.: National Academies Press; 2000. <https://doi.org/10.17226/9728>.
- [39] Haute Aut Santé. [Guide_bonnes_pratiques_simulation_sante_guide.pdf](#).
- [40] Quinn F, Keogh P, McDonald A, Hussey D. A pilot study comparing the effectiveness of conventional training and virtual reality simulation in the skills acquisition of junior dental students. *Eur J Dent Educ Off J Assoc Dent Educ Eur* 2003;7:13–9. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0579.2003.00264.x>.
- [41] 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 Off J Assoc Dent Educ Eur* 2003;7:164–9. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0579.2003.00309.x>.
- [42] Wierinck E, Puttemans V, Swinnen S, van Steenberghe D. Effect of augmented visual feedback from a virtual reality simulation system on

- manual dexterity training. *Eur J Dent Educ Off J Assoc Dent Educ Eur* 2005;9:10–6. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0579.2004.00351.x>.
- [43] Wierinck E, Puttemans V, van Steenberghe D. Effect of reducing frequency of augmented feedback on manual dexterity training and its retention. *J Dent* 2006;34:641–7. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2005.12.005>.
- [44] Urbankova A. Impact of computerized dental simulation training on preclinical operative dentistry examination scores. *J Dent Educ* 2010;74:402–9.
- [45] Luciano C, Banerjee P, DeFanti T. Haptics-based virtual reality periodontal training simulator. *Virtual Real* 2009;13:69–85. <https://doi.org/10.1007/s10055-009-0112-7>.
- [46] Steinberg AD, Bashook PG, Drummond J, Ashrafi S, Zefran M. Assessment of faculty perception of content validity of PerioSim, a haptic-3D virtual reality dental training simulator. *J Dent Educ* 2007;71:1574–82.
- [47] Kolesnikov M, Žefran M, Steinberg A, Bashook P. PerioSim: Haptic virtual reality simulator for sensorimotor skill acquisition in dentistry. *2009 IEEE Int Conf Robot Autom* 2009. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152751>.
- [48] Dangxiao Wang null, Yuru Zhang null, Jianxia Hou null, Yong Wang null, Peijun Lv null, Yonggang Chen null, et al. iDental: A Haptic-Based Dental Simulator and Its Preliminary User Evaluation. *IEEE Trans Haptics* 2012;5:332–43. <https://doi.org/10.1109/TOH.2011.59>.
- [49] de Boer IR, Bakker DR, Wesselink PR, Vervoorn JM. [The Simodont in dental education]. *Ned Tijdschr Tandheelkd* 2012;119:294–300. <https://doi.org/10.5177/ntvt.2012.06.12105>.
- [50] Eve EJ, Koo S, Alshihri AA, Cormier J, Kozhenikov M, Donoff RB, et al. Performance of dental students versus prosthodontics residents on a 3D immersive haptic simulator. *J Dent Educ* 2014;78:630–7.
- [51] Abramov AY, Daurova FU, Weitz SV, Weitz tv. introduction of tactile simulator virteasy dental to teach the students of dental faculty at russian peoples friendship university.
- [52] Dixon J, Towers A, Martin N, Field J. Re-defining the virtual reality dental simulator: Demonstrating concurrent validity of clinically relevant assessment and feedback. *Eur J Dent Educ* 2021;25:108–16. <https://doi.org/10.1111/eje.12581>.
- [53] Pohlenz P, Gröbe A, Petersik A, von Sternberg N, Pflesser B, Pommert A, et al. Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *J Cranio-Maxillo-Fac Surg Off Publ Eur Assoc Cranio-Maxillo-Fac Surg* 2010;38:560–4. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2010.02.011>.
- [54] Haroon Z, Azad AA, Sharif M, Aslam A, Arshad K, Rafiq S. COVID-19 Era: Challenges and Solutions in Dental Education 2020;30:3.
- [55] Milcent A-S. Les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction de l'empathie chez l'utilisateur : application au domaine de la formation médicale. phdthesis. HESAM Université, 2020.

- [56] Panait L, Akkary E, Bell RL, Roberts KE, Dudrick SJ, Duffy AJ. The role of haptic feedback in laparoscopic simulation training. *J Surg Res* 2009;156:312–6. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2009.04.018>.
- [57] Kurrek MM, Devitt JH. The cost for construction and operation of a simulation centre. *Can J Anaesth J Can Anesth* 1997;44:1191–5. <https://doi.org/10.1007/BF03013344>.
- [58] Flin R, Maran N. Identifying and training non-technical skills for teams in acute medicine. *Qual Saf Health Care* 2004;13 Suppl 1:i80-84. https://doi.org/10.1136/qhc.13.suppl_1.i80.
- [59] Hôpital Virtuel de Lorraine. L'Hôpital Virtuel Lorraine n.d. <http://hopital-virtuel.univ-lorraine.fr/> (accessed January 31, 2022).
- [60] PRESAGE - Faculté de Médecine Henri Warembourg n.d. <https://medecine.univ-lille.fr/presage> (accessed February 11, 2022).
- [61] Qu'est-ce que le DPC ? – URPS des Chirurgiens Dentistes des Pays de la Loire n.d. <https://www.urpscdpdl.org/formation-regionale-dpc/quest-ce-que-le-dpc/> (accessed February 13, 2022).
- [62] Fonds européen de développement régional. Eur Sengage En Fr Portail Fonds Eur 2021. <https://www.europe-en-france.gouv.fr/fr/fonds-europeens/fonds-europeen-de-developpement-regional-FEDER> (accessed February 11, 2022).
- [63] Plan de relance pour l'Europe. Comm Eur - Eur Comm n.d. https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_fr (accessed February 11, 2022).
- [64] Shafi M, Molisch AF, Smith PJ, Haustein T, Zhu P, De Silva P, et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. *IEEE J Sel Areas Commun* 2017;35:1201–21. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307>.
- [65] Swetha S, Raj D. Optimized video content delivery over 5G networks. 2017 2nd Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES, 2017, p. 1000–2. <https://doi.org/10.1109/CESYS.2017.8321232>.
- [66] Chorianopoulos K, Divitini M, Hauge JB, Jaccheri L, Malaka R. Entertainment Computing - ICEC 2015: 14th International Conference, ICEC 2015, Trondheim, Norway, September 29 - October 2, 2015, Proceedings. Springer; 2015.
- [67] Soto SV, Luna J, Cano A. Big Data on Real-World Applications. BoD – Books on Demand; 2016.
- [68] Tang JKT, Xie H, Wong T-L. A Big Data Framework for Early Identification of Dropout Students in MOOC. In: Lam J, Ng KK, Cheung SKS, Wong TL, Li KC, Wang FL, editors. *Technol. Educ. Technol.-Mediat. Proactive Learn.*, Berlin, Heidelberg: Springer; 2015, p. 127–32. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48978-9_12.
- [69] Zheng H, Fang L, Ji M, Strese M, Özer Y, Steinbach E. Deep Learning for Surface Material Classification Using Haptic and Visual Information. *IEEE Trans Multimed* 2016;18:2407–16. <https://doi.org/10.1109/TMM.2016.2598140>.

- [70] Wang S, Su Z, Ying L, Peng X, Zhu S, Liang F, et al. Accelerating magnetic resonance imaging via deep learning. 2016 IEEE 13th Int. Symp. Biomed. Imaging ISBI, 2016, p. 514–7. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2016.7493320>.
- [71] Georgescu M-I, Ionescu RT, Verga N. Convolutional Neural Networks With Intermediate Loss for 3D Super-Resolution of CT and MRI Scans. IEEE Access 2020;8:49112–24. <https://doi.org/10.1109>
- [72] Daher S, Hochreiter J, Schubert R, Gonzalez L, Cendan J, Anderson M, et al. The Physical-Virtual Patient Simulator: A Physical Human Form With Virtual Appearance and Behavior. Simul Healthc 2020;15:115–21. <https://doi.org/10.1097>.
- [73] <https://www.oecd.org/fr/education/scolaire/Connectes-pour-apprendre-les-eleves-et-les-nouvelles-technologies-principaux-resultats.pdf>
[Connectes-pour-apprendre-les-eleves-et-les-nouvelles-technologies-principaux-resultats.pdf](https://www.oecd.org/fr/education/scolaire/Connectes-pour-apprendre-les-eleves-et-les-nouvelles-technologies-principaux-resultats.pdf)

Apports et perspectives de la réalité virtuelle dans le cadre de la formation des étudiants en chirurgie dentaire.

DE LA FONTAINE Amaury – p. (88) : ill. (32) ; réf. (73).

Domaines : Odontologie ; Enseignement ; Exercice professionnel.

Mots clés libres : Formation ; Enseignement ; Pédagogie ; Simulation ; Simulateurs ; Réalité Virtuelle ; Simulation numérique ; Typodont ;

Résumé de la thèse :

La montée en puissance des technologies du numérique, et notamment de la réalité virtuelle dans la formation par la simulation en chirurgie dentaire, suscite un intérêt grandissant parmi les enseignants et les étudiants. De nombreuses questions accompagnent toutefois cet engouement pour ces nouvelles approches pédagogiques : quels en sont les principes ? quelle efficacité pour la formation ? quelle fiabilité ? quelles utilisations ? Comment les faire fonctionner correctement et les entretenir aux vues des ressources humaines et matérielles de l'université ? Quelles solutions et alternatives pédagogiques devant un champ de contraintes de plus en plus complexe dans l'enseignement en santé ?

Cette thèse a pour objet d'apporter des éléments de réponse documentés et illustrés à ces interrogations. Après avoir retracé les grandes lignes de l'histoire de la simulation en odontologie, ce travail dresse un état de l'art des simulateurs dentaires virtuels et des autres outils pédagogiques numériques disponibles. Il fait ensuite l'analyse des avantages et inconvénients, opportunités et points de vigilance de ces différentes technologies et de leur applicabilité technique et organisationnelle pour la formation des chirurgiens-dentistes.

Composition du Jury :

Président : Madame la Professeure Caroline DELFOSSE

Assesseurs : Madame le Docteur Emmanuël BOCQUET
Monsieur le Docteur Thomas TRENTESAUX
Monsieur le Docteur Thomas MARQUILLIER