UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

2014 N° 25

THÈSE

Présentée pour le Diplôme d'État de Docteur en Chirurgie Dentaire

par

JENNY Alexis

né le 16 août 1987 à Haguenau

RÉALITÉ AUGMENTÉE : INTÉRÊTS CLINIQUES ET PÉDAGOGIQUES EN CHIRURGIE DENTAIRE

Président : Professeur FEKI Ahmed

Assesseurs : Docteur JOERGER Roger
Docteur BAHI-GROSS Sophie
Docteur LUTZ Jean-Christophe
Docteur REYS Guillaume

Remerciements

À l'issue de la rédaction de cette thèse, je tiens à remercier les personnes qui me font l'honneur de constituer le jury :

Je voudrais, tout d'abord, remercier monsieur le Professeur **Ahmed FEKI**, qui me fait l'honneur de présider ce jury de thèse et pour qui, ma gratitude est à la hauteur de ma considération.

Mes remerciements tout particuliers vont à monsieur le Docteur **Guillaume REYS** qui m'aura très vivement encouragé et stimulé par son enthousiasme, et m'a judicieusement orienté vers ce sujet original.

Je remercie monsieur le Docteur **Roger JOERGER** pour sa confiance et le soutien qu'il m'a accordé tout au long de ma formation. Toujours intéressé et intéressant, il aura été un modèle et une grande source d'inspiration pour moi.

J'adresse une pensée reconnaissante et affectueuse à madame le Docteur **Sophie BAHI-GROSS**, avec qui les échanges ont toujours été très positifs. C'est en clinique que j'ai spécialement apprécié son professionnalisme, sa nature enjouée et bienveillante, qui ont efficacement influencé mon mental durant ma formation.

C'est pratiquement au terme de mon travail que j'ai retrouvé et redécouvert monsieur le Docteur **Jean-Christophe LUTZ**, avec qui je partage la même curiosité et le même intérêt pour ces technologies au service du praticien. J'espère que nos chemins se croiseront plus souvent, pour des échanges toujours plus riches.

Je me tourne, à présent, vers les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse, qui m'ont entouré, conseillé, soutenu durant cette période de recherches mais de solitude parfois.

Odrade SAENZ qui m'aura, avec détermination, aidé à terminer la rédaction de cette thèse et sans qui je ne serai certainement pas parvenu au même résultat.

Alain BREGY, pour ses avis et ses conseils qui m'ont été très précieux.

Christian KLINGER, son enthousiasme communicatif, son talent auront eu des effets stimulants. Je n'aurais pu me passer de son aide indispensable.

Le laboratoire FLECHER, à Strasbourg, pour m'avoir autorisé à numériser mes modèles.

Philippe TARDIEU pour m'avoir permis de confronter nos idées sur un même terrain.

Johann MOREAU et Stéphane NICOLAU de l'IRCAD pour m'avoir guidé dès le début, et permis de croiser la route du Docteur LUTZ.

Toute l'équipe d'AUGMENT, créatrice du logiciel utilisé pour cette thèse. Les échanges que nous avons eus se sont avérés extrêmement enrichissants, j'espère que cette collaboration et cette complicité perdureront dans les années à venir.

L'équipe de LAYAR qui a su répondre efficacement à mes questions et avec qui j'espère garder contact.

Je m'adresse, à présent, à vous :

Je remercie madame le Professeur Anne-Marie MUSSET pour notre bonne entente, la confiance qu'elle a pu m'accorder et pour la qualité des relations professionnelles que nous avons entretenues.

À monsieur le Docteur Philippe NEUMANN, vous avez assuré très efficacement ma formation, m'avez soutenu et rassuré par votre attitude toujours bienveillante dans les divers moments de ma vie d'étudiant encore hésitant. Votre bonne humeur et vos précieux conseils accompagnant mes gestes de néophyte, n'ont fait qu'agrandir l'admiration et la reconnaissance que j'ai pour vous.

À monsieur le Docteur David MULLER et Gabrielle PREVOT, pour m'avoir permis d'effectuer mes premiers remplacements avec votre soutien et votre confiance.

À vous, mes parents, pour votre indéfectible bienveillance.

À mon frère et à mes soeurs, pour vos encouragements, mais également vos pressions, pour que je termine enfin cette thèse.

À mes amis, Christophe, François, Jérôme, Julien, Laurent, Matthieu (aussi), Nicolas, Romain et Stephen sans qui cette thèse aurait sûrement été finie des mois plus tôt.

Et surtout à toi, Déborah, tu es la seule, chaque jour, à augmenter ma réalité.

Sommaire

1. Introduction 7
2. Définitions 8
2.1. Qu'est- ce que la réalité augmentée ? 8
2.1.1. Les affichages par superposition périphérique de type HUD 11
2.1.2. Les affichages par superposition complète 12
2.2. Histoire et place de la réalité augmentée 13
2.3. Développement et tendances 15
3. Matériels et méthodes actuels 17
3.1. Se repérer dans l'espace 17
3.1.1. Par flux optique et analyse d'image 17
3.1.1.1. Suivi de marqueurs 18
3.1.1.2. Reconnaissance de formes et caractéristiques 18
3.1.1.3. Reconnaissance des contours 19
3.1.1.4. Télémétrie optique 19
3.1.1.5. Par infrarouge 20
3.1.2. Par satellite de positionnement et boussole 21
3.1.3. Par gyroscope et accéléromètre 21
3.1.4. Par réseaux sans fil et RFID 22
3.2. Matériels exploitables 23
3.2.1. Ordinateur Personnel 23
3.2.2. Systèmes mobiles - Smartphones et tablettes 23
3.2.3. Head Mounted Display et lunettes connectées 24
3.2.3.1. EyeTap 25
3.2.3.2. Optinvent ORA-1 26
3.2.3.3. Laster See-thru 27
3.2.3.4. Vuzix M100 28
3.2.3.5. Vuzix M2000AR 29
3.2.3.6. Vuzix STAR 1200XLD 30
3.2.3.7. Google Glass 31
3.2.3.8. Meta Space Glass 32

3.2.3.9. Epson Moverio BT-200 33
3.2.3.10. Oculus Rift 34
3.3. Les défis de l'affichage en réalité augmentée 35
3.3.1. Effet avant-plan/arrière-plan 36
3.3.2. Latence 37
3.3.3. Mal de mer virtuel 37
3.3.4. La stéréoscopie et la distance interpupillaire 38
3.3.5. Contraste, transparence et luminance 39
4. Utilisation dans le milieu médical 40
4.1. Utilisation à l'Institut de Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif 40
4.2. Le système Peuchot 42
4.3. Utilisation des Google Glass en salle d'opération 42
4.4. Des lunettes pour voir les cellules cancéreuses 44
4.5. Réalité augmentée pour combattre les douleurs dues aux membres fantômes 46
4.6. Réalité augmentée pour la pose de brackets d'orthodontie 48
5. Didacticiel de conversion d'un examen d'imagerie CBCT en RA 49
5.1. Choix des logiciels utilisés 49
5.1.1. Augment 49
5.1.2. InVesalius 51
5.1.3. Blender 52
5.1.4. Les formats 53
5.1.4.1. Le DICOM et les formats volumiques 53
5.1.4.2. Les formats surfaciques : .STL et .OBJ 53
5.2. Réalisation et préparation du modèle 54
5.2.1. Segmentation et exportation 54
5.2.2. Importation dans Blender 56
5.2.3. Optimisation 58
5.2.4. Mise en évidence 59
5.2.5. Exportation 60
5.3. Rendu 61

6. Applications possibles de la RA en chirurgie dentaire 63
6.1. Applications pédagogiques 64
6.1.1. Travaux pratiques de prothèse fixée 64
6.1.2. Travaux pratiques d'endodontie 65
6.1.3. Travaux pratiques d'odontologie conservatrice 66
6.1.4. Cours magistraux de morphologie 67
6.2. Applications cliniques 68
6.2.1. Utilisation en chirurgie, implantologie et consentement éclairé 68
6.2.2. Utilisation en prothèse 70
6.2.3. Utilisation en endodontie 70
6.2.4. Utilisation en radiologie 71
6.2.5. Utilisation durant l'anesthésie 71
6.2.6. Utilisation en orthodontie 72
6.3. Intérêt pour le praticien 73
6.4. Intérêt pour le patient 73
6.5. Intérêt pour l'étudiant 73
7. Discussion et avenir de la technologie 74
7.1. Critique du protocole utilisé 74
7.2. Problématiques des HMD et leurs possibles solutions 75
7.2.1. Interface praticien/matériel 75
7.2.1.1. Commandes vocales 75
7.2.1.2. Commandes visuelles et gestuelles 76
7.2.1.3. Commandes tactiles 77
7.2.2. Données médicales confidentielles 78
7.2.3. Avenir du matériel 78
7.3. Projet de logiciel 79
8. Conclusions 80
Bibliographie et sources 82
Légal 84
Source des photos 85
Glossaire 87

1. Introduction

Les préparations des chirurgies complexes suivent généralement le même schéma. Tout d'abord une planification théorique, comprenant l'étude, la réalisation et la mise au point d'un protocole sur un modèle physique (plâtre, résines) ou virtuel (informatique). Puis, la réalisation du soin sur le patient. Dans certains cas difficiles, les chirurgiens-dentistes peuvent demander des guides opératoires, mais généralement, la planification est affichée sur un écran. Ainsi, en l'absence de guide, le praticien fait appel à sa subjectivité, à son appréciation et à son imagination pour appliquer le protocole prévu sur le patient.

Durant les cours magistraux, l'étudiant qui apprend une technique de soin, dispose d'une représentation théorique qu'il doit ensuite appliquer à un modèle physique durant les travaux pratiques. Tout comme le praticien expérimenté, il doit imaginer comment l'appliquer à ce nouveau support. Les premiers soins sur un patient, unique et ne ressemblant à aucun modèle, peuvent faire perdre tout repère acquis au fil des entraînements.

La mise en oeuvre d'un soin nécessite toujours une préparation, aussi bien pour le praticien expérimenté que pour l'étudiant en formation. Nous passons d'un environnement idéal (où le praticien et l'étudiant disposent de toutes les informations théoriques) à un environnement réel, avec des contraintes et où la prise de repères peut se compliquer. Dans ces deux cas, il existe une fracture entre la partie théorique et la partie pratique. Cependant, un moyen intéressant permet d'apporter les informations nécessaires au praticien, sans que celui-ci ait besoin de quitter son patient des yeux.

La réalité augmentée est un ensemble de techniques visant à incorporer, dans une prise de vue réelle, des éléments virtuels tels que du texte, des vidéos ou des objets tridimensionnels. Cette technologie a été mise au point ces vingt dernières années et n'a pris son essor que tout récemment. Les applications dans la vie courante sont limitées pour l'instant, faute de matériel adéquat. Quelques essais ont été réalisés ou sont en cours dans le milieu médical. Mais dans le milieu de la chirurgie dentaire, très peu de recherches ont été faites. Cependant, il est possible d'imaginer quelques applications concrètes de la réalité augmentée.

Et si nous pouvions guider en temps réel le chirurgien-dentiste, apprenti ou confirmé, dans ses tâches de tous les jours ? Si nous pouvions lui mettre sous les yeux des aides et des guides en rapport avec son geste, afin de garantir confort et sécurité, durant les actes des plus courants jusqu'aux plus délicats ?

L'objectif de cette thèse est de déterminer l'intérêt apporté par la réalité augmentée dans notre profession. Nous devrons tout d'abord expliciter le véritable domaine de la réalité augmentée. Nous analyserons ensuite quelques-unes des techniques ainsi que le matériel permettant de les mettre en oeuvre. Après avoir cité quelques exemples de l'utilisation de la réalité augmentée dans le milieu médical, nous imaginerons une série d'applications destinées à l'étudiant ou au praticien en chirurgie dentaire.

Pour finir, nous reviendrons sur les difficultés de mise en application et explorerons quelques solutions pour les résoudre.

Ce document se veut ludique et interactif : vous découvrirez au fil des pages d'étranges pictogrammes. Je vous invite à vous munir d'un smartphone ou d'une tablette afin de pouvoir flasher les QR Codes. Vous pourrez aussi télécharger les logiciels cités dans cette thèse afin d'afficher du contenu en réalité augmentée.

2. Définitions

2.1. Qu'est- ce que la réalité augmentée ?

La réalité augmentée (RA) est un ensemble de techniques visant à modifier en **temps réel** notre perception de notre environnement afin d'y ajouter des informations virtuelles : le virtuel augmente le réel. Bien qu'il soit théoriquement possible de parler de réalité augmentée concernant chacun des cinq sens, le terme actuel se réfère préférentiellement à l'augmentation de la vision.

Insistons sur le fait que le **réel** et le **virtuel** ne s'opposent pas. L'opposé du réel est l'irréel. Quant au **virtuel** (une possibilité du réel), il s'oppose à **l'actuel** (ce qui est). Il composent tous deux la réalité. "Réalité virtuelle" n'est donc pas un oxymore. Généralement, lorsque nous parlons de réel, sans précision, nous faisons allusion au réel actuel.

Malgré les apparences, réalité et virtualité sont des sujets complexes. Il est difficile de trouver des définitions simples, délimitant le champ de chacun des domaines où virtuel et réel se mélangent. Beaucoup parlent de continuum entre le réel (actuel) et le virtuel, les situant aux extrémités d'une ligne ouvrant un champ d'applications dans lequel ces deux paramètres s'intriquent (*Figure 1*).

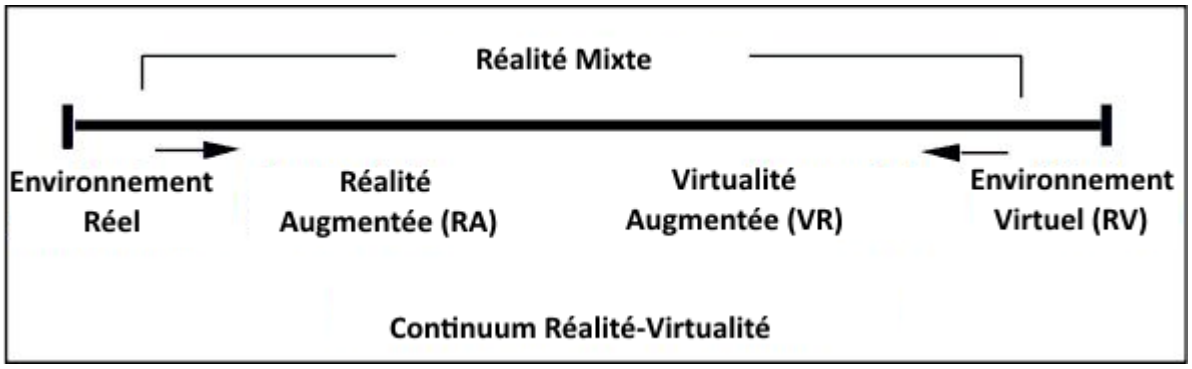

Figure 1: Schéma simplifié du continuum réél-virtuel proposé par Paul Milgram, et coll[1].

Cependant, dès lors que nous essayons de discerner le champ de chacun des sous-ensembles, le consensus n'est plus aussi évident et beaucoup de définitions données sont contradictoires. Parfois même, un terme est pris pour un autre. Afin de faciliter la compréhension, voici quelques définitions simplifiées des différents champs de la réalité mixte ou hybride.

Il est important d'imaginer que le réel (sous-entendu actuel) et le virtuel peuvent se croiser sans s'exclure. Selon la proportion de l'un ou de l'autre et du degré d'interaction, nous pouvons déterminer dans quel champ de la réalité hybride nous nous trouvons (*Figure 2*).

La **réalité augmentée (RA)** se contente d'ajouter des informations. Il n'est pas question ici d'influence de l'actuel sur le virtuel ou vice versa. Le virtuel se superpose à la perception de l'utilisateur afin d'enrichir son expérience. Certaines interactions avec l'utilisateur sont cependant possibles, comme le fait de diriger l'utilisateur vers un site Internet à travers son navigateur.

La **réalité modulée ou médiée (mediated reality)**[2] est un voisin très proche de la réalité augmentée qui modère les informations reçues par l'utilisateur. Ce type de technique peut, par exemple, choisir de cacher un objet ou une source lumineuse afin d'aider l'utilisateur dans une tâche.

---

[1] *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum / Paul MILGRAM, Haruo TAKEMURA, , Akira UTSUMI et Fumio KISHINO - [1994]*

[2] *Mediated Reality with implementations for everyday life / Steve MANN - MIT Press Journal [2006] Lien : http://wearcam.org/presence-connect/ par Steve MANN*

La **réalité virtuelle** crée un monde entièrement virtuel dans lequel l'utilisateur peut interagir et évoluer. Les murs et les obstacles n'ont pas de bases physiques et les sensations sont contrôlées par un ordinateur. Attention cependant, la réalité virtuelle n'est pas totalement détachée de la réalité actuelle car, si la perception est totalement altérée, l'orientation et les sensations de mouvement ne le sont pas. Ce paradoxe entre les sens peut donner lieu à certains malaises.

La **virtualité augmentée (VA)** est un croisement entre la réalité augmentée et la réalité virtuelle. Cette technique est peu développée actuellement. Elle consiste à inviter des éléments de la réalité virtuelle dans un environnement réel qui délimite l'aire de jeu. L'utilisateur peut ici interagir avec l'environnement ou les personnages, ces interactions auront des conséquences dans le monde virtuel. Dans ce cas, nous pouvons dire que c'est le réel (actuel) qui augmente le virtuel.

Le terme **réalité mixte** englobe, en général, l'ensemble des techniques mêlant réel et virtuel. L'affichage d'informations complémentaires ne se superposant pas obligatoirement à un objet observé, ne fait partie, à proprement parler, ni de la réalité augmentée, ni de la virtualité augmentée. Elle est donc désignée par le terme générique de réalité mixte. Il en va ainsi de l'affichage d'une carte et d'une direction par exemple. Certains articles, trouvant le terme trop générique, incluent ces applications dans la catégorie la plus proche, c'est à dire la réalité augmentée. Ces applications seront explorées dans le paragraphe 2.1.1 : "Les affichages par superposition périphérique de type HUD" .

Toutes les "réalités" décrites ci-dessus font partie des réalités dites "altérées" ou "hybrides". Les confusions entre ces définitions disparaîtront lorsque l'ensemble des techniques seront considérées comme faisant partie d'une expérience de réalité hybride ou altérée.

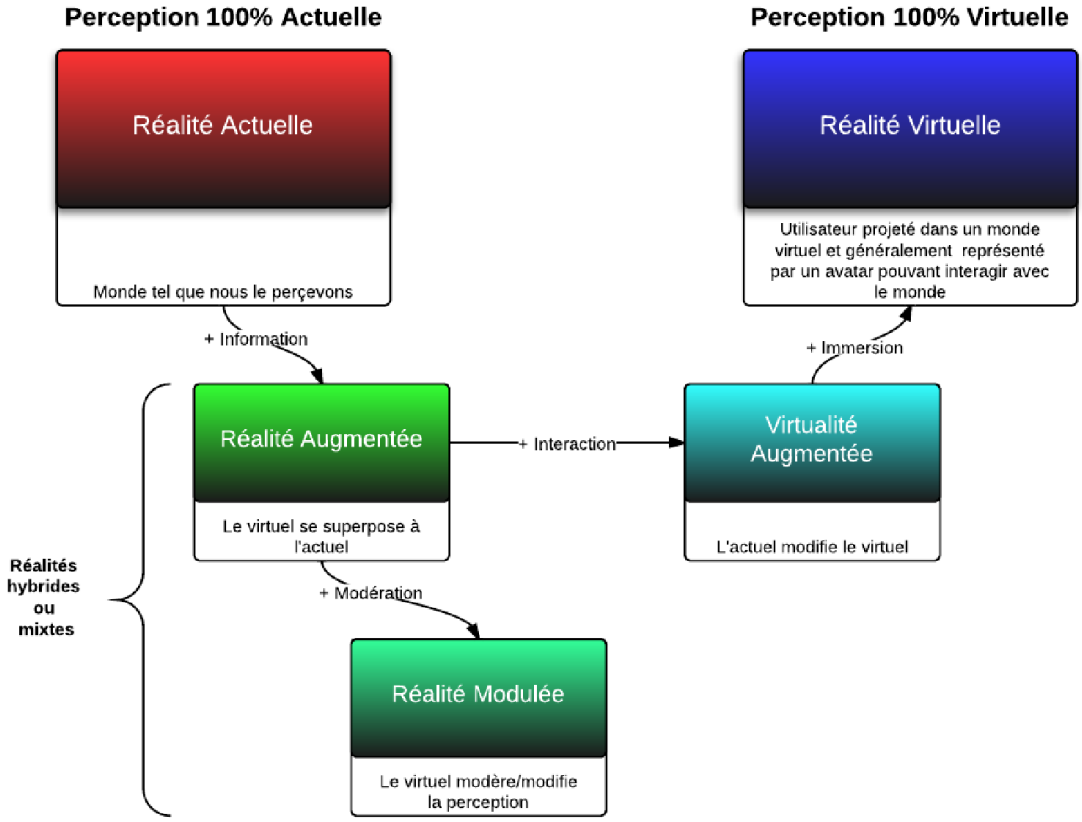

Figure 2: Proposition d'organisation des différents ensembles de réalités altérées visuelles.

Toute réalité hybride nécessite l'acquisition et l'analyse de la position, absolue ou relative, ou d'un déplacement de l'utilisateur et/ou d'un objet afin de fournir, en fonction du contexte, des informations pertinentes. L'acquisition, l'affichage et le traitement des données peuvent être combinés, comme dans un téléphone, ou séparés sur des systèmes plus complexes.

Bien que la réalité augmentée puisse déjà être approchée avec des appareils de type smartphone, tablette ou ordinateur, l'utilisation optimale se fera grâce à des *Head Mounted Display* (HMD) qui permettent aussi une utilisation en *Affichage Tête-Haute* (ATH) ou *Head-Up Display* (HUD). Les ATH ou HUD sont des interfaces destinées à être affichées dans le champ de vision de l'utilisateur, lui laissant les mains libres et permettant de se concentrer sur une tâche sans devoir "baisser ou tourner la tête" pour vérifier des instructions.

2.1.1. Les affichages par superposition périphérique de type HUD

Nous pouvons approcher la réalité augmentée en affichant des informations dans le champ de vision de l'utilisateur, lui laissant ainsi la possibilité de continuer à travailler ou surveiller son environnement. Ces informations ne se superposent pas forcément à l'entité à laquelle elles sont rattachées.

Les affichages périphériques sont utilisés depuis le début des années 1990 dans les appareils militaires tels que les avions de chasse (*Figure 3*). L'affichage de la vitesse, accélération et direction, est permis à l'aide de simples capteurs disposés dans un appareil mobile ou déduit des positions GPS. L'interface peut être réfléchie sur une plus grande surface, comme un pare-brise par exemple, pour s'incruster dans le champ de vision de l'utilisateur sans obstruer sa vue (*Figure 3*).

Figure 3 : Exemples d'application d'interface en ATH.
A gauche : Affichage tête haute militaire sur l'écran d'un avion de chasse.
A droite : Affichage d'informations sur le pare-brise d'une voiture via Garmin HUD.

De par sa facilité à mettre en oeuvre, c'est ce type d'application qui a été mis en avant lors des présentations des premières lunettes connectées, à destination du grand public. Les premières applications permettent l'affichage de textes ou d'images en fonction des besoins de l'utilisateur. Ce type d'affichage ne nécessite pas forcément d'acquisition vidéo : dans le cas de la présentation d'une carte (*Figure 4*), une puce GPS et une boussole serviront à repérer et orienter l'utilisateur, ce qui ne demande finalement que peu de ressources.

Figure 4 : Affichage d'un trajet (en haut à droite) dans le champ de vision d'un utilisateur sur Google Glass.

2.1.2. Les affichages par superposition complète

L'affichage par superposition est souvent appelé "**vraie réalité augmentée**". Il exploite totalement le champ de vision de l'utilisateur, et non simplement la périphérie, afin de proposer une nouvelle expérience. Contrairement à l'affichage périphérique, les informations peuvent être attachées à des objets réels qu'elles ne quitteront pas. Ce type de réalité augmentée nous intéresse davantage car elle peut-être le vecteur d'informations plus complètes qu'une simple interface déportée. Bien qu'il soit possible d'utiliser un écran quelconque nous préférerons les HMD qui proposent une meilleure expérience.

Pour exemple d'application de réalité augmentée, nous pouvons citer **Layar** disponible sur smartphones *Android* et *iOS*. Fondée par la société hollandaise du même nom, elle est l'une des premières applications pratiques à destination du grand public. Elle permet, en utilisant les différents capteurs du smartphone tels que l'accéléromètre, le GPS, le gyroscope, la boussole et la caméra, d'analyser le contenu du champ de vision de l'utilisateur et sa position, afin d'afficher une couche d'informations ("layer" en anglais, d'où est dérivé le nom de l'application). L'application peut également analyser une image ou un texte et afficher du contenu contextuel.

Ce logiciel a été appliqué aux lunettes Google Glass en proposant une expérience identique à celle sur smartphone (*Figure 5*). Cette application fonctionne mieux aux États-Unis où le nombre de filtres et d'éléments renseignés sont plus nombreux. En France, l'intérêt est très limité au vu du faible nombre d'informations mises à disposition.

Figure 5 : A gauche : Logo de l'application LAYAR.
A droite : Interface portée sur Google Glass affichant les offres immobilières.

Il est également possible, par exemple, d'afficher des éléments en 3D qui s'intègrent dans l'environnement (*Figure 6*) mais cela nécessite davantage d'informations. Afin que l'utilisateur ait l'illusion de voir un objet vraisemblable, il faut corriger le rendu de cet objet en temps réel. Il est nécessaire d'acquérir non seulement la position de base de l'objet mais aussi la position, la direction et l'orientation actuelles de l'utilisateur dans les trois plans de l'espace. L'affichage 3D nécessite donc un protocole beaucoup plus rigoureux.

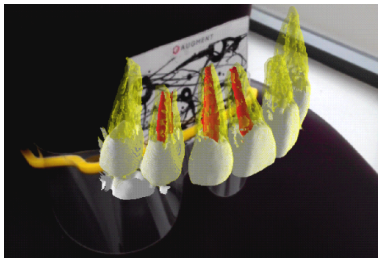

Figure 6 : Affichage en réalité augmentée d'un modèle 3D via AUGMENT.

2.2. Histoire et place de la réalité augmentée

Le concept même de réalité augmentée est ancien et trouve sa place dans la fiction. Lyman Frank Baum, auteur du livre *Le magicien d'Oz*, décrit dans le livre *The Master Key* en 1901, une paire de lunettes qui permet au porteur, lorsqu'il regarde un personnage, de voir apparaître écrit sur son front s'il est bon, mauvais, sage…. Le héros du livre explique par ailleurs que ces lunettes et les autres objets qu'il a à sa disposition, sont "en avance d'un siècle".

> "On the other hand," continued the Demon, "some people with fierce countenances are kindly by nature, and many who appear to be evil are in reality honorable and trustworthy. Therefore, that you may judge all your fellow-creatures truly, and know upon whom to depend, I give you the Character Marker. It consists of this pair of spectacles. While you wear them every one you meet will be marked upon the forehead with a letter indicating his or her character. The good will bear the letter 'G,' the evil the letter 'E.' The wise will be marked with a 'W' and the foolish with an 'F.' The kind will show a 'K' upon their foreheads and the cruel a letter 'C.' Thus you may determine by a single look the true natures of all those you encounter."

> "Some people might think I was a fool to give up those electrical inventions," he reflected; "but I'm one of those persons who know when they've had enough. It strikes me the fool is the fellow who can't learn a lesson. I've learned mine, all right. It's no fun being a century ahead of the times!"

Extrait de *The Master Key* de Lyman Frank Baum[3].

	Version en ligne de "The Master Key" de Lyman Franck Baum http://www.gutenberg.org/ebooks/45347

Suite à l'invention du cinéma, plusieurs inventeurs ont tenté d'enrichir cette expérience en travaillant sur l'immersion. C'est le cas de Morton Heilig avec son Sensorama en 1950. Une des premières machines abouties (*Figure 7*) permettait à un spectateur de se plonger dans le premier monde "virtuel". Cette machine projetait un film de promenade en vélo dans Brooklyn et permettait au spectateur de s'incliner, de regarder autour de lui, de ressentir le vent et d'écouter les sons en stéréo. Cette machine pourrait être classée dans les appareils de réalité virtuelle, mais ce qui est particulièrement intéressant c'est qu'elle permettait de vivre une situation réelle, ou du moins réaliste, et non entièrement virtuelle.

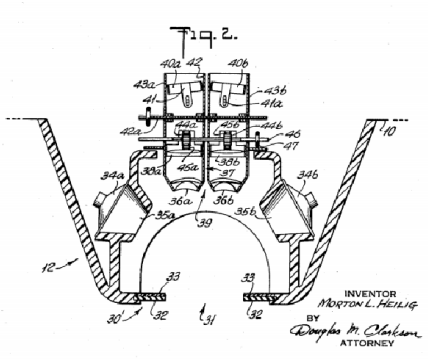

Figure 7 : Diagramme de fonctionnement du Sensorama de Morton L. Heilig pour le bureau des brevets américains[4]. L'utilisateur place sa tête en face des deux objectifs en bas.

[3] *The Master Key / Lyman Frank BAUM [1901]*
[4] *Brevet du Sensorama déposé par Morton HEILIG [1961]*

Interview de Morton Heilig
https://www.youtube.com/watch?v=vSINEBZNCks

Le terme de “réalité augmentée” n’apparaît qu’au début des années 1990. D’après Kangdon LEE, il est attribué au professeur Tom CAUDELL[5] ingénieur chez Boeing, qui cherchait une solution pour faciliter la fabrication d’avions. Cet ingénieur a développé un logiciel permettant d’afficher, par superposition, les emplacements de câbles, afin d’éviter que les constructeurs n’aient à regarder les diagrammes sur un manuel.

En 1992, LB Rosenberg crée le premier logiciel véritablement fonctionnel pour l’US Air Force : le **Virtual Fixture** qui permettait d’améliorer la téléprésence et la télémanipulation. Traditionnellement, un opérateur posté derrière un écran, dirigeant un robot ou un drone à distance, peut donner n’importe quel ordre au risque d’endommager le matériel si un mouvement se révèle impossible. Le Virtual Fixture recueillait des informations sur le terrain et déterminait la position des obstacles. L’utilisateur, de son côté, voyait s’afficher ces entraves. Si un ordre donné présentait un risque pour l’appareil, il était modifié de façon à ne pas endommager l’appareil ou l’environnement. Comme une règle sur laquelle s’appuie un crayon pour tracer une ligne, le Virtual Fixture permet donc à l’utilisateur, à l’aide de retour de forces, d’effectuer des mouvements précis sans risque. Le Virtual Fixture est utilisé aujourd’hui pour la mise au point de chirurgie robotisée.

Exemples d’utilisation du Virtual Fixture
http://brl.ee.washington.edu/~sina/mediahr.html

La même année, Steven Feiner, Blair MacIntyre et Doree Seligmann ont soumis un prototype d’un système appelé KARMA[6] (Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance que nous pouvons traduire par Maintenance assistée par Réalité Augmentée) permettant d’afficher virtuellement un plan de rechargement d’imprimante dispensant de la lecture du manuel d’utilisation. Ils ont utilisé des triangles comme marqueurs (en blanc sur *Figure 8*) afin de repérer l’objet à traquer (l’imprimante) ainsi qu’une paire de lunettes adaptée à l’utilisateur.

Figure 8 : Utilisateur (à gauche) utilisant le KARMA pour charger une imprimante en projetant des images fantômes (à droite).

[5] *Augmented Reality in Education and Training / Kangdon LEE*
TechTrends 56, no. 2 [2012] : 13-21. doi:10.1007/s11528-012-0559-3
[6] *Site web de Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance*
Lien : http://monet.cs.columbia.edu/projects/karma/karma.html

2.3. Développement et tendances

La réalité augmentée est utilisée principalement dans les divertissements, mais aussi dans la vente. Par exemple, la société Ikea® propose de placer chez soi, avant achat, des meubles à l'échelle en RA, grâce à un marqueur imprimé. Dans certains magasins, Lego® permet de voir le modèle construit d'un jouet, lui aussi à l'échelle, afin de se donner une idée du résultat final… et donner envie à l'enfant (ou au parent) de l'acheter.

	Vidéo de Réalité Augmentée proposée par IKEA® https://www.youtube.com/watch?v=vDNzTasuYEw

	Vidéo de Réalité Augmentée proposée par LEGO® https://www.youtube.com/watch?v=8UxWkZtUKaI

Le parc du Futuroscope dispose d'un pavillon, ouvert depuis le 5 avril 2008, nommé "Les Animaux du Futur". Dans cette attraction, les visiteurs sont invités à se munir de jumelles pour observer des animaux imaginaires vivant à différentes époques. En réalité, ces jumelles utilisent la réalité augmentée pour animer ces animaux dans l'environnement du visiteur. Les jumelles sont équipées de deux écrans permettant donc un affichage 3D.

> Dans les jumelles, il y a une caméra ainsi qu'un afficheur en relief. Le décor n'a pas besoin d'être vu en relief du fait de sa distance supérieure à un mètre ; en revanche, les animaux sont vus en trois dimensions, comme les objets virtuels qui apparaissent dans votre main. Cela fonctionne particulièrement bien quand un animal tentaculaire fonce vers vous, et s'approche à moins d'un mètre. Vous percevez nettement ce déplacement, à cause du relief. **Il apporte une dimension supplémentaire : celle de l'émotion**. On a forcément peur quand on voit un animal étrange avancer doucement vers nous... sans savoir s'il est amical… ou mortel ! (rires) C'est un effet classique du cinéma en relief, mais la grosse innovation est de pouvoir choisir vous-même votre point de vue, et d'interagir librement avec les animaux. C'est véritablement une expérience inédite que nous proposons avec les Animaux du Futur.

Extrait de la brochure de presse 'Les Animaux du Futur'.

	Brochure d'informations concernant "Les Animaux du Futur" http://www.futuroscope.com/ressources/presse/presse_futuroscope_animaux_du_futur.pdf

Le développement des téléphones intelligents (smartphones) depuis l'introduction de l'iPhone® en 2007 a permis au grand public d'acquérir du matériel à bas prix, comportant des applications mobiles enrichies en diverses fonctionnalités. Le succès grandissant de ces terminaux de poche a poussé les constructeurs à améliorer leurs performances et à rajouter des capteurs : caméra, accéléromètre, gyroscope, boussole, GPS… .

Les applications de réalité augmentée ont pu se développer sur smartphones, notamment Layar™, devenue très populaire. Ces applications utilisent, pour la plupart, uniquement les capteurs embarqués par le terminal.

Depuis 2011, suite aux premières rumeurs concernant le développement de lunettes connectées (smartglasses) par Google® (les Google Glass™), le grand public a montré un intérêt certain pour ces nouveaux matériels, donnant plus de visibilité à un marché grandissant sur lequel plusieurs entreprises sont présentes : Optinvent®, Vuzix® ou Laster®. Ces entreprises développent plusieurs modèles à destination du grand public et des professionnels, notamment des professionnels de santé.

En février 2014, à l'occasion du Mobile World Congress (MWC) à Barcelone, un standard de réalité augmentée à été proposé : **l'Augmented Reality Markup Langage (ARML) 2.0** . Ce standard permettrait une homogénéisation des techniques (*Figure 9*) en passant par un langage permettant de décrire totalement une expérience de RA.

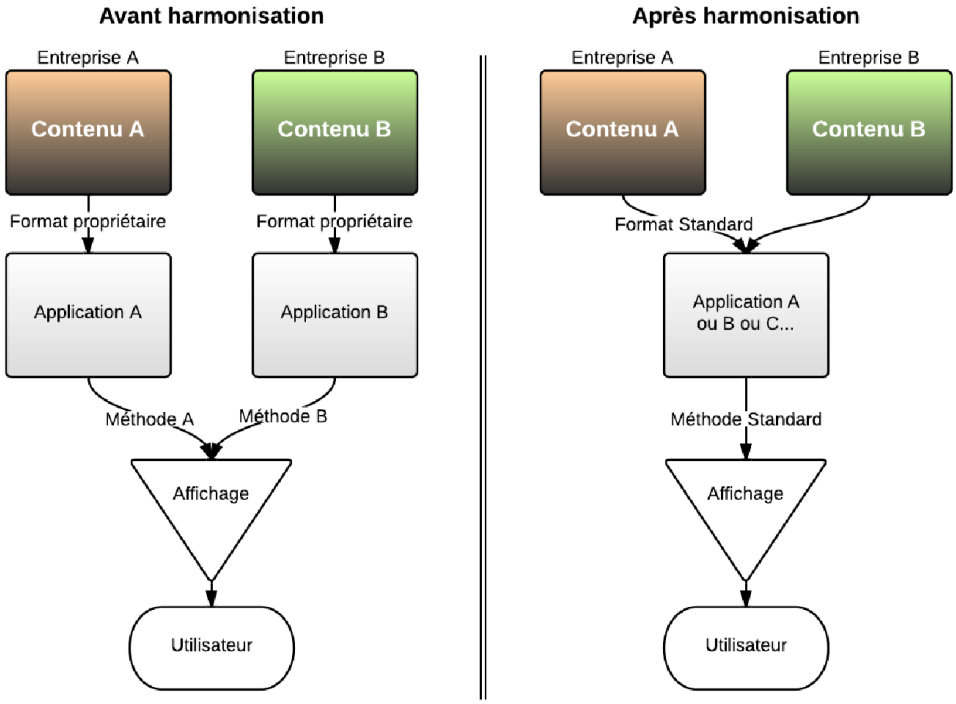

Figure 9 : Explication très simplifiée de l'état actuel des techniques de RA et de l'apport du ARML inspiré de "A Proposal For AR Browser Interoperability"[7], publiée par le AR Browser Interoperability Engineering group.

D'autres langages tentent aussi de s'imposer comme standards, tel le *Augmented Reality Application Format* développé par le *Moving Picture Experts Group* (MPEG). Les constructeurs (Samsung, intel, Google, Qualcomm..) proposent eux aussi leur propre librairie de fonctions.

Le chemin vers une harmonisation des techniques est encore long.

[7] *A Proposal for AR Browser Interoperability / AR Browser Interoperability Engineering group*
Lien :
http://www.perey.com/ARStandards/AR_Browser_Interoperability_Architecture_Jan_21_2014_v1_2.pdf

3. Matériels et méthodes actuels

Le but de cette partie est d'analyser les principales méthodes servant à déterminer la position de l'objet à augmenter par rapport à l'utilisateur, de déterminer quels matériels sont utilisables pour explorer la RA et enfin, d'examiner les difficultés de rendu.

3.1. Se repérer dans l'espace

Afin d'augmenter de façon pertinente la vision de l'utilisateur, il faut d'abord connaître sa position par rapport à ce qu'il regarde. Parfois, seules la position et l'orientation géographique suffisent, mais d'autres fois, il est nécessaire d'avoir des informations plus précises.

Il est théoriquement possible d'utiliser toutes les techniques utilisant un émetteur et un récepteur, mais certaines sont plus fiables ou mieux adaptées que d'autres en fonction des besoins. Ces capteurs reposent généralement sur le principe de la triangulation ou de croisement de données. Si un capteur ne peut explorer qu'une dimension (la distance entre le récepteur et le capteur), pour explorer *n* dimensions avec précision nous devrons utiliser *n+1* récepteurs (*Figure 10*). Attention cependant, les caméras explorent, elles, deux dimensions. Il est donc possible de déterminer une position dans les trois plans de l'espace rien qu'avec deux caméras.

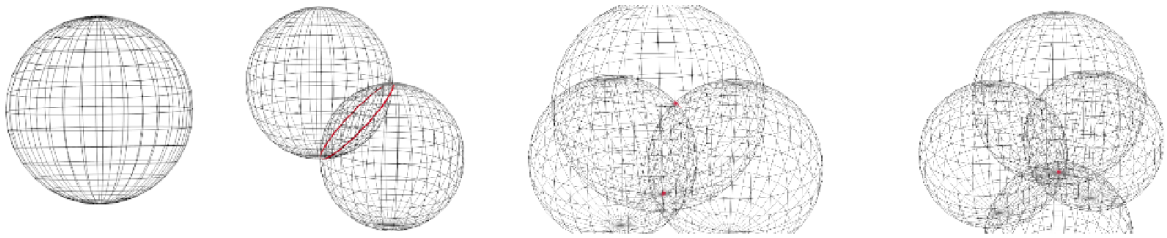

Figure 10 : Chaque capteur détermine la distance d'un objet.
Un capteur aura donc une sphère de points autour de lui correspondant à cette distance.
Avec deux capteurs, les positions possibles correspondent à un cercle (en rouge) situé à l'intersection des deux sphères.
Avec trois capteurs, seulement deux points (en rouge) sont candidats.
L'ajout d'un quatrième capteur permet de discriminer la bonne position (en rouge).

3.1.1. Par flux optique et analyse d'image

La façon la plus commune de se repérer pour les applications de RA, est d'utiliser un flux vidéo. Du fait du grand nombre de techniques, il existe de très nombreux articles sur le suivi en trois dimensions d'un objet. Nous survolerons quelques uns des moyens disponibles afin de déterminer la position optique d'un objet.

Certaines de ces techniques ont comme grand avantage d'être **non invasives**.

3.1.1.1. Suivi de marqueurs

Cette méthode repose sur la reconnaissance visuelle d'un élément remarquable : le marqueur. Il se présente sous la forme d'un imprimé hautement contrasté (*Figure 11*), comprenant généralement plusieurs formes géométriques.

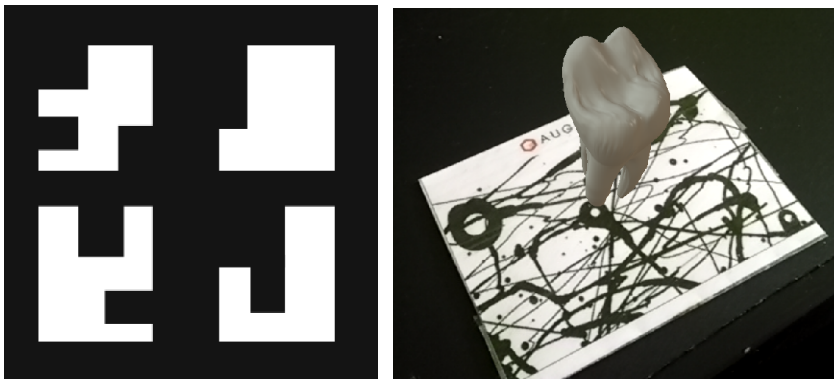

Figure 11 : A gauche : Exemple de marqueur visuel hautement contrasté.
A droite : Utilisation d'un marqueur AUGMENT pour afficher un objet 3D.

3.1.1.2. Reconnaissance de formes et caractéristiques

Il est aussi possible de réaliser de la RA sans marqueur, en suivant des points sur une image ou en cherchant une forme particulière, par exemple une main dans l'application HandyAR[8] (*Figure 12*).

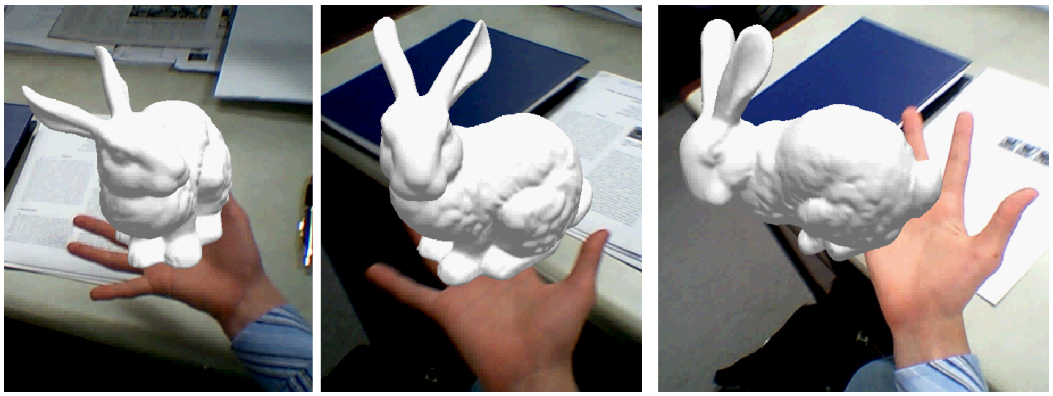

Figure 12: Tracking de la main pour l'application HandyAR.

La reconnaissance de caractéristiques nécessite l'analyse des formes et des motifs, parfois sur plusieurs images, afin d'adjoindre à un objet une liste de caractéristiques[9]. Ces caractéristiques seront ensuite recherchées dans les images suivantes afin de déterminer le mouvement d'un objet.

Ce type de tracking est utilisé pour le suivi des visages : un algorithme peut reconnaître yeux, nez et bouche qui seront, chez une personne donnée, toujours à la même distance les uns des autres. Ensuite, image après image, ces caractéristiques seront recherchées et leurs positions enregistrées, ce qui permet de déterminer la nouvelle orientation d'un objet par rapport au point de départ.

Si une reconnaissance des formes n'est pas possible, les logiciels peuvent déterminer des points remarquables qu'ils suivront ensuite (*Figure 13*).

---

[8] *Handy AR: Markerless Inspection of Augmented Reality Objects Using Fingertip Tracking / Taehee Lee, Tobias Höllerer*
Lien : http://ilab.cs.ucsb.edu/projects/taehee/HandyAR/
[9] *Robust Feature-based Object Tracking / Bing HAN, William ROBERTS, Dapeng WU et Jian LI*

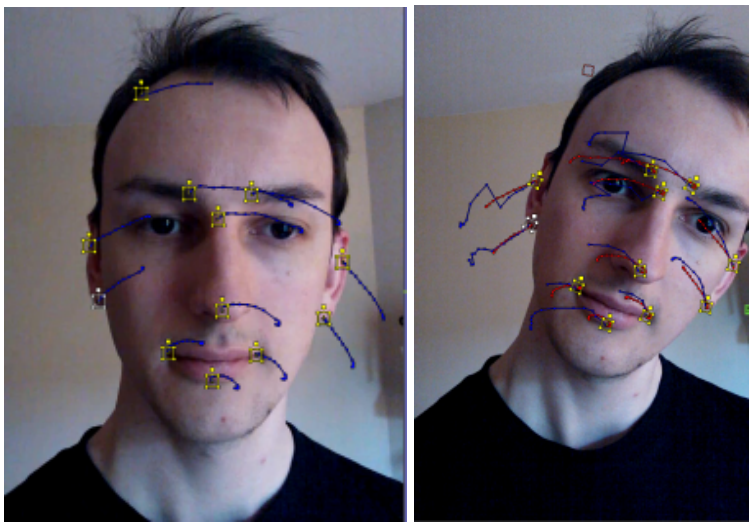

Figure 13 : Tracking d'un visage réalisé en deux temps à l'aide de Blender™.

3.1.1.3. Reconnaissance des contours

La reconnaissance des contours repose sur un traitement de l'image afin de déterminer les zones de discontinuité où les contrastes sont élevés. Les contours de l'objet observé seront mis en corrélation avec les contours d'un modèle 3D à replacer, afin de déduire la position de l'objet à afficher. Ce principe est expliqué dans la *Figure 14*.

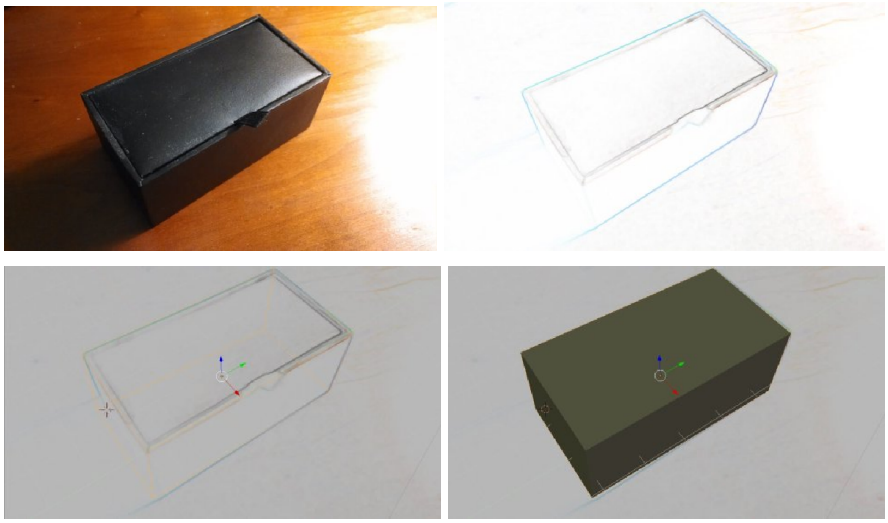

Figure 14 : En haut : Un traitement d'image permettant la détermination des contours d'objet. En bas : Principe de la reconnaissance des contours, réalisé avec Blender™.

3.1.1.4. Télémétrie optique

Il est possible de repérer la position et l'orientation d'un objet en utilisant la télémétrie optique. La télémétrie peut se faire avec un repère servant d'échelle (dite stradimétrique) ou avec un laser. Ces techniques sont généralement utilisées par les géomètres pour effectuer leurs mesures. En échelle stradimétrique, connaissant *de facto* les dimensions de l'échelle mise dans le même plan que l'objet à mesurer, il est possible d'en déduire la distance. Dans le cas de télémétrie laser, un appareil calculera le déphasage entre le rayon émis et réfléchi pour en déduire la distance entre l'appareil et l'objet pointé. Il nous faudra alors plusieurs capteurs dans un télémètre optique afin de déterminer la position dans les trois plans de l'espace.

C'est de cette manière que l'équipement *Robodent®* de Jean-Louis Roche repère la position du contre-angle du praticien et la position de la mâchoire du patient[10] (*Figure 15*). Le télémètre repère la position d'un **plan de référence**, habilement intégré à une gouttière que porte le patient, qui permettra de suivre ses mouvements. L'ordinateur pourra ainsi déterminer la position du contre-angle, repéré via le télémètre par rapport à ce plan, et ainsi guider le chirurgien.

Figure 15 : Marqueur et télémètre du système Robodent®.
Photo tirée de l'étude menée par ARMAND et coll, dans Réalités Cliniques vol .20 n°4 2009.

3.1.1.5. Par infrarouge

Il est possible de réaliser un suivi de points via un système infrarouge et ce, en trois dimensions [11]. Des marqueurs réfléchissants sont alors placés sur le sujet. Une longueur d'onde est réfléchie par ces marqueurs, puis captée par la caméra infrarouge. C'est sur ce principe que repose la capture de mouvements (motion capture) (*Figure 16*).

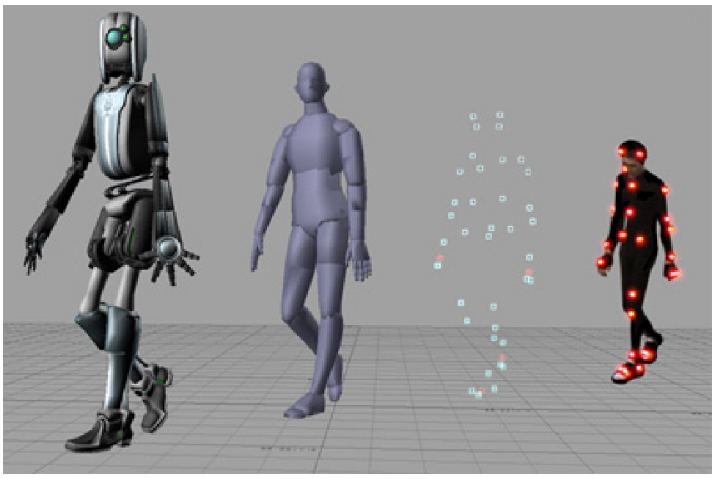

Figure 16 : Combinaison avec marqueur l'infrarouge permettant une capture de mouvements et retranscription sur un modèle 3D.

[10] *Chirurgie implantaire sans lambeau, intérêts de la robotique passive système Robodent® / ARMAND, LEGAC, MIR et ALLARDI*
Réalités Cliniques vol. 20 n°4 [2009]
[11] *3D TRACKING BASED ON INFRARED CAMERAS / Olivier MAGNEAU, Patrick BOURDOT, Rachid GHERBI*
Lien : http://archives.limsi.fr/Individu/magneau/publi/iccvg2002_magneau.pdf

3.1.2. Par satellite de positionnement et boussole

Le Global Positioning System (GPS) est un système grand public de localisation par satellite, sous contrôle de l'armée des États-Unis d'Amérique. Accessible au grand public depuis 1983, ce système s'est depuis imposé comme un système de choix pour retrouver sa position géographique. La dépendance vis-à-vis des États-Unis a poussé le développement de systèmes alternatifs : GLONASS pour la Russie, déjà utilisable ; Galiléo pour l'Europe, qui devrait fonctionner d'ici 2020 ; Beidou pour la Chine et Indian Regional Navigational Satellite System pour l'Inde.

Le guidage par satellite est généralement couplé à une boussole de façon à recueillir l'orientation de l'utilisateur. La précision du positionnement est d'environ 10 mètres.

L'utilisation de GPS pour les applications de RA est courant, cependant il est très difficile d'imaginer utiliser ce moyen de repérage en médecine.

3.1.3. Par gyroscope et accéléromètre

Le gyroscope, du grec gyro- ("γῦρος") "cercle" et -scope ("σκοπέω") "observer", est un appareil servant à mesurer l'angle de rotation d'un appareil sur un à trois axes selon la sensibilité du dispositif. Il a été mis au point par Léon Foucault en 1852.

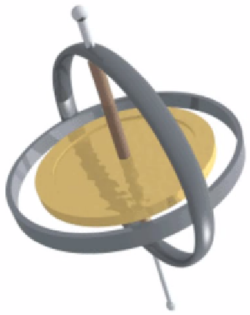

Figure 17 : Illustration d'un gyroscope à 3 axes effectuant un mouvement de précession.

Le gyroscope repose sur le principe de la toupie : un objet ayant un mouvement angulaire élevé s'opposera aux forces qui tenteront de le déstabiliser. Si les extrémités du gyroscope sont immobilisées et que nous appliquons un mouvement, des forces contraires s'appliqueront aux points d'attaches du gyroscope. En plaçant des capteurs au niveau de ces axes-là, il est possible de déterminer la valeur de l'inclinaison.

Un accéléromètre, quant à lui, mesure tous types d'accélérations (ralentissements et gravité compris).

L'inconvénient de ces capteurs est qu'ils ne peuvent capter qu'une position relative à un point de départ et ne pourront analyser le point de vue de l'utilisateur. Cependant, leur utilisation est parfois profitable pour **compléter des informations recueillies** par d'autres types de capteurs.

3.1.4. Par réseaux sans fil et RFID

Il est possible de repérer la position de l'utilisateur en exploitant la triangulation d'ondes, quelles qu'elles soient : des ondes GSM (réseau télécom), WiFi ou encore Bluetooth. Cependant, les positions déterminées sont probabilistes quand elles sont utilisées séparément, voire même inaccessibles dans certaines situations : le réseau GSM est incapable d'interpréter les données, il faut passer par une connexion Internet, le réseau WiFi n'est pas disponible partout et le Bluetooth n'est pas très répandu comme balise de repérage. La précision du repérage dépend du nombre de puces utilisées, des performances de cesdites puces et de la présence ou non d'interférences. **La précision annoncée est de l'ordre du mètre à la dizaine de mètres**.

La radio-identification, souvent appelée RFID pour Radio Frequence Identification, est un système couplant un microcircuit associé à une antenne. Il existe des systèmes actifs, comportant une batterie et des systèmes passifs, pour lesquels le lecteur envoie une onde électromagnétique spécifique absorbée par l'antenne, puis injectée ensuite dans le microcircuit qui en tire l'énergie nécessaire à son fonctionnement. Le circuit module ensuite la fréquence radio pour émettre une nouvelle onde comportant des données analogiques. Les fréquences absorbées et émises sont comprises dans le domaine des ondes radio et, d'après les connaissances actuelles, ne présentent que peu de risques pour la santé.

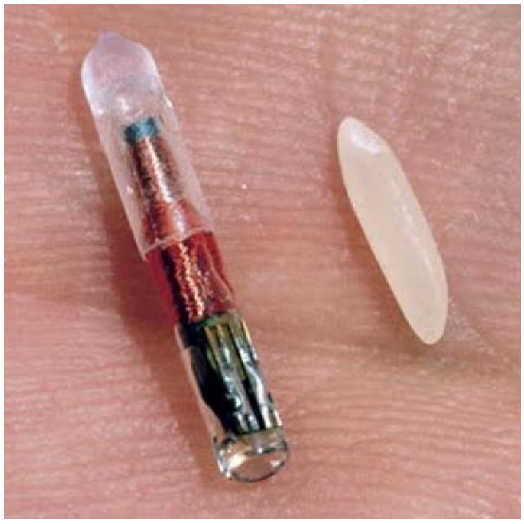

Figure 18 : Une puce RFID à côté d'un grain de riz.

Il est possible de suivre des mouvements grâce aux puces RFID actives, qui présentent de meilleures performances lorsque le suivi doit se faire sur de grandes distances, dans des environnements complexes ou demandant une précision supérieure[12]. Il faudra alors, comme dans le cas de la télémétrie, plusieurs capteurs afin de déterminer la position d'une puce RFID dans les trois plans de l'espace.

Peu de travaux à ce jour, présentent le RFID comme une méthode fiable pour déterminer la position précise d'un objet dans l'espace. Les applications permettent un suivi relativement grossier du déplacement d'une puce. Cependant, leur utilisation en médecine est de plus en plus courante pour le suivi de matériel et de personnel[13].

[12] *Indoor RFID Tracking / RFID Center*
Lien : http://www.rfidc.com/docs/indoor_rfid_tracking.htm
[13] *RFID Solutions for Healthcare Industry / RFID for Healthcare*
Lien : http://healthcare.gaorfid.com/

3.2. Matériels exploitables

3.2.1. Ordinateur Personnel

Utiliser un ordinateur classique pour réaliser de la RA peut paraître la solution la plus évidente car :

- ses performances (processeurs et carte graphique notamment) sont accrues par rapport à un matériel embarqué ;
- il peut effectuer des rendus volumiques plus facilement ;
- les architectures sont bien maîtrisées par les développeurs ;
- il offre une certaine souplesse de par le choix des composants ;
- il peut avoir accès à une large plage de mémoire.

Cependant :

- l'encombrement empêche les mouvements ;
- l'affichage sur un écran n'offre pas une grande souplesse d'utilisation ;
- l'acquisition (caméra par exemple) et l'affichage ne sont généralement pas couplés, ce qui rend l'utilisation difficile en cas de mouvement de l'observateur.

Réaliser de la réalité augmentée sur ordinateur peut être pertinent dans certains cas, notamment quand il n'est pas nécessaire de se déplacer. Cependant, au fauteuil et lorsque nous le comparons aux autres solutions, l'ordinateur ne s'impose pas forcément comme une solution de premier choix de par son encombrement et parce que l'affichage se fait sur un écran déporté (la réalité augmentée doit apporter des informations en se superposant à la perception de l'utilisateur). Ce problème pourrait être contourné en utilisant un écran transparent ou des techniques d'affichage holographique, mais ceci n'est pas répandu à l'heure actuelle.

3.2.2. Systèmes mobiles - Smartphones et tablettes

Dans le domaine de la réalité augmentée, les smartphones font le lien entre le monde de l'ordinateur personnel (PC) et les HMD. Du fait de l'indisponibilité relative des HMD à l'heure actuelle, les smartphones nous sont utiles pour nos expérimentations.

Leur système d'exploitation et leurs composants se rapprochent, quand ce ne sont pas exactement les mêmes, de ceux utilisés sur les smartglasses, ce qui en font un matériel idéal pour se donner une idée de leurs performances et de leur ergonomie.

Parmi les avantages, nous retrouvons :

- une maniabilité accrue de par leur petite taille et leur légèreté ;
- plusieurs capteurs sont réunis en un matériel ;
- les performances sont très correctes.

Cependant :

- la plage de mémoire est actuellement limitée ;
- les logiciels permettant un rendu volumique en réalité augmentée sont très rares ;
- le matériel n'est pas adapté à un environnement de soin.

3.2.3. Head Mounted Display et lunettes connectées

L'idée même de lunettes permettant d'afficher des informations n'est pas nouvelle, mais ce n'est que tout récemment que leur réalisation et leur utilisation sont devenues possibles, grâce notamment à la miniaturisation des composants (*Figure 19*).

Figure 19 : Évolution du développement des lunettes EyeTap au fil des années, portées par leur concepteur Steve MANN. D'après Angeline Stewart pour Wikimedia Commons.

Afin de guider les lecteurs intéressés par le développement d'une application de RA sur HMD, nous avons catalogué les particularités de quelques paires de lunettes, annoncées comme capables d'effectuer de la réalité mixte. Les caractéristiques citées ci-après sont sujettes à évoluer et à être complétées. Nous ne déterminerons pas ici quelle est la meilleure paire de lunettes, mais nous tenterons de donner une idée des capacités de chacune. Nous serons attentif aux critères de la liste ci-dessous.

- **La résolution** est le nombre de pixels affichés sur une surface. Plus celle-ci est élevée, moins l'image est pixelisée (effet escalier). La résolution s'exprime en nombre de pixels en abscisse multiplié par le nombre de pixels en ordonnée, par exemple: 1280x720 ;

- **Le champ visuel** est la surface sur laquelle l'affichage s'étend. Plus il est large, plus le champ de vision peut être recouvert d'informations. Le champ visuel s'exprime en degrés (°) ;
    - La résolution rapportée à la surface donnera une idée de la densité de l'affichage. Plus la densité est élevée, meilleure sera l'image ;

- **La luminance** est le rapport de l'intensité de la lumière générée par l'affichage sur la surface projetée. Plus elle est élevée, mieux l'affichage pourra contraster avec un arrière-plan. La luminance s'exprime en candela par mètre carré ($cd.m^{-2}$) ou nits ;

- **Les capteurs** détermineront quelles informations peuvent être exploitées par le HMD pour repérer l'utilisateur et déterminer son point de vue ;

- **Le système d'exploitation** jouera sur les applications disponibles. Certaines applications fonctionnant déjà sur Android™ seront plus facilement intégrées dans les lunettes équipées de ce système ;

- La batterie et le poids donneront des informations ergonomiques sur le confort de l'appareil ;

- **Les architectures des puces** donneront une idée des capacités et de la souplesse de calcul actuel.

3.2.3.1. EyeTap

Figure 20 : Homme portant un modèle uni-occulaire de l'EyeTap.

Les lunettes *EyeTap* (*Figure 20*) sont développées par Steve MANN, professeur canadien de l'université de Toronto. Il a acquis le statut de cyborg de par sa volonté de porter en permanence un HMD. Il est inventeur du terme de "sousveillance"[14] qui consiste à enregistrer le point de vue de l'utilisateur.

Les caractéristiques techniques de l'*EyeTap* ne sont pas dévoilées car l'appareil est continuellement en développement et n'est pas, à ce jour, destiné à un usage commercial. Malgré tout, son fonctionnement est connu (*Figure 21*) : un verre semi-transparent (le "diverter") reflète une partie de la lumière destinée à l'oeil de l'utilisateur, elle est renvoyée vers une caméra. Ce même verre sert aussi à refléter une image, envoyée par un écran, qui ira se superposer à la vision de l'utilisateur[15].

Figure 21 :

A gauche : diagramme de fonctionnement de l'EyeTap.

A droite : trajet des différentes sources lumineuses sur un prototype de l'EyeTap, avec en vert l'image du monde réel, en rouge, l'image virtuelle ajoutée.

	Site Web de l'Eye Tap http://www.eyetap.org

[14] *Exploring Equiveillance / Ian KERR*
Lien : http://www.anonequity.org/weblog/archives/2006/01/exploring_equiv_1.php
[15] *Site internet de l'eyetap*
Lien : http://www.eyetap.org/research/eyetap.html

3.2.3.2. Optinvent ORA-1

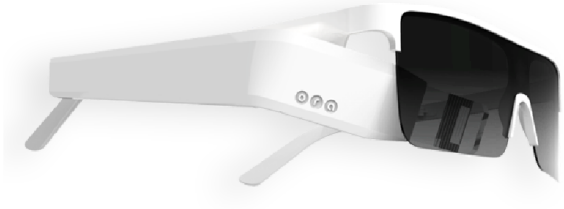

Figure 22 : Lunettes Optinvent ORA-1 telles que présentées sur leur site Internet.

Affichage :	Format 4:3 avec 33 pixels / degrés Champ de vision de 24° Luminance de ~3000 Nits Équivalent à un écran de 40cm situé à 1m Mode 1: 0° du centre - Mode 2: 20° du centre
Poids total - Batterie incluse :	70g
Autonomie :	4 heures en utilisation intense et 8 heures en utilisation modérée
Puces et Connectivité :	Dual Core 1.2Ghz ARM Cortex - 1Go de mémoire DDR - 4Go Flash Bluetooth® 4 and WiFi 802.11 b/g/n avec Miracast - microUSB
Interface :	Zone tactile et boutons
Capteurs :	9 axes et GPS Caméra 5 Mégapixels
Système d'exploitation :	Android 4.2.2 Jelly Bean

Les lunettes d'*Optinvent* profitent de la technologie *FLIP-Vu* (*Figure 23*), permettant à l'utilisateur d'avoir le choix entre un affichage déporté dans la périphérie du champ de vision ("Glance" mode) et un mode réalité augmentée où les informations se superposent aux éléments perçus par l'utilisateur.

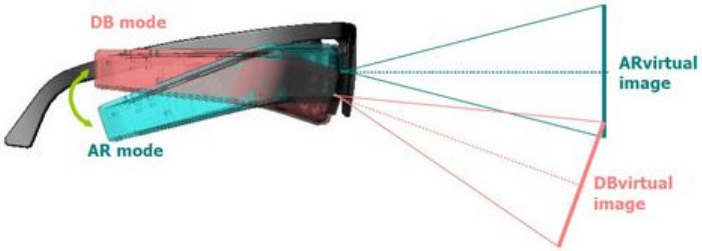

Figure 23 : Schéma expliquant le "Flip-Vu" spécifique à cette paire de lunettes.

	Site internet d'Optinvent http://optinvent.com/see-through-glasses-ORA

3.2.3.3. Laster See-thru

Figure 24 : Lunettes Laster See-thru™ telles que présentées sur leur page Kickstarter.

Affichage :	Résolution de 800 x 600 pixel @ 24 Bits en 4/3 ou 16/9 Champ de vision de 25° Luminance >5200 nits
Poids - Batterie incluse :	55 g
Autonomie :	6 – 8 heures
Connectivité :	Bluetooth 3.0 (compatible Bluetooth 4.0)
Capteurs :	Gyroscopes, Accéléromètre, Compas, Navigation via GPS

La société *Laster Technologies* a été créée en 2005 par une équipe spécialisée en optique et traitement d'image[16]. D'après les concepteurs, cette paire de lunettes offre une précision lors de la reconnaissance des formes, de l'ordre de 4-5mm. La société de production compte se lancer dans le domaine médical et publie déjà quelques concepts très simplifiés de l'interface pouvant être proposée à un chirurgien (*Figure 25*).

Figure 25 : Rendu proposé par LASTER pour une application médicale de la RA.

	Site internet des Laster See-thru http://laster.fr/products/seethru/

[16] *Présentation de la société LASTER*
Lien : http://laster.fr/laster/societe/

3.2.3.4. Vuzix M100

Figure 26 : Lunettes VUZIX M100™.

Affichage :	Résolution de 400x240 pixels en 24 bits Champ de vision de 15° Équivalent à un écran mobile situé à 35cm
Luminosité :	>2000 nits
Autonomie :	Batterie interne de 600 mAh - Jusqu'à 6h d'autonomie Batterie externe de 3800mAh
Puces et connectivité :	OMAP4430 at 1GHz - 1GB RAM - 4GB flash - Support MicroSD jusqu'à 32 Gig - Wi-Fi 802.11b/g/n - Bluetooth 4.0
Interface :	4 boutons - Support du contrôle vocal - Support du contrôle gestuel
Capteurs :	Moteur de reconnaissance gestuel à 3 degrés de liberté (L/R,U/D,N/F) Capteur de proximité et luminosité ambiante Capteur de positionnement de tête à 3 degrés Gyroscope 3 axes - Accéléromètre 3 axes - Compas et magnétomètre Capteur photo 5Mp - Capteur vidéo 1080p
Audio :	Oreillette - Microphone avec annulation des bruits
Système d'exploitation :	Android 4.0 Ice Cream Sandwich

L'affichage des informations dans ce cas présent ne se fait pas sur un écran transparent se superposant à la perception de l'utilisateur, mais agit comme un écran déporté, comme les Google Glass™. À moins d'afficher un flux vidéo augmenté sur l'écran du dispositif, cette paire de lunettes ne sera utilisée qu'en interface de type HUD.

3.2.3.5. Vuzix M2000AR

Figure 27 : Vuzix M2000AR™ telle que présentée sur la fiche du produit.

Affichage :	Résolution de 1280 x 720 monochrome ou couleur ~80% de transmission de lumière ambiante l'environnement Champ de vision de 30° Équivalent à un écran de 55cm situé à 1m
Capteurs :	Gyroscope à 3 axes Accéléromètre à 3 axes Magnétomètre à 3 axes Caméra de 5 mégapixels Possibilité d'enregistrement jusqu'à 83 images par seconde
Autonomie :	2-3 heures à utilisation maximale

Ce matériel permet à l'utilisateur de disposer d'un affichage se superposant complètement à son champ de vision *(Figure 28)*. Il a l'avantage de pouvoir se fixer d'un côté ou de l'autre du crâne.

Figure 28 : Utilisateur portant les Vuzix M2000AR™.

	Site internet de Vuzix http://www.vuzix.com

3.2.3.6. Vuzix STAR 1200XLD

Figure 29 : Vuzix STAR 1200XLD™.

Affichage :	Deux écrans LCD de 852 x 480 pixels Champ de vision de 35° en diagonale Équivalent à un écran de 60cm situé à 1m Résolutions supportées : 640 x 480 à 1280 x 720 (720p)
Capteurs :	Gyroscope à 3 axes Accéléromètre à 3 axes Magnétomètre à 3 axes 3 axes de mouvement de têtes Caméra enregistrant jusqu'en Full HD 1080p de 1Hz à 60Hz
Autonomie :	2-3 heures à utilisation maximale

Cette paire de lunettes a l'avantage d'être stéréoscopique, le constructeur met en avant la possibilité de calibrer la distance interpupillaire, qui sera développée plus loin dans ce manuscrit.

Des essais de réalité augmentée ont été réalisés avec ces lunettes couplées avec le système Microsoft® Kinect™, pour la reconnaissance de mouvements. Le résultat est intéressant mais il est important de noter que ces interactions entre l'utilisateur et ces lunettes ne sont possibles, actuellement, que via le système de Microsoft®.

3.2.3.7. Google Glass

Figure 30 : Première version des Google Glass™, la version Explorer 2012.

Affichage :	Résolution HD (720p) Équivalent à un écran de 25 cm situé à 1 mètre
Capteurs :	Caméra : Photos - 5 MP et Vidéos - 720p Gyroscope et accéléromètre
Audio :	Via conduction osseuse
Puces et Connectivité :	Wifi 802.11b/g - Bluetooth 12 Go de mémoire utilisable
Autonomie :	Journée complète d'utilisation modérée
Système d'exploitation :	Android Ice Cream Sandwich 4.0.4

Les *Google Glass*™ (*Figure 30*) ont été annoncées courant 2012 avec une expérimentation publique fermée, aux États-Unis. Les personnes ayant accès à ce premier modèle, le modèle Explorer mis sur le marché, sont appelées les "Glass Explorer". La date de mise sur le marché public n'est pas encore connue, cependant quelques hôpitaux et professionnels de santé ont déjà pu profiter de cet appareil.

L'affichage est déporté dans le coin supérieur droit du champ de vision. Ces lunettes ne peuvent effectuer de "vraie" réalité augmentée par superposition complète, mais peuvent afficher la vidéo actuellement filmée par l'appareil et y ajouter une couche d'information en RA.

Site internet des Google Glass
http://www.google.com/glass/start/

3.2.3.8. Meta Space Glass

Figure 31 : Meta Space Glass™ telle que présentée sur le site Internet.

Affichage :	Affichage Stéréoscopique via deux écrans LCD transparents 1280x720 pixels pour les deux affichages Champ de vision de 40°
Puces et connectivité :	Intel® i5 CPU - 4Go RAM - Stockage 128Go SSD Wi-Fi: 802.11b/g/n - Bluetooth 4.0 - USB 3.0
Capteurs :	Capteurs à 9 axes : Accéléromètre, Gyroscope et Compas Deux caméras RGB
Poids :	180g

Cette paire de lunettes est développée, entre autres, par Steve MANN[17], inventeur de l'*EyeTap*. La disponibilité est prévue pour septembre 2014. Elle repose sur un système d'exploitation personnalisé et revendique une interface "holographique" (*Figure 32*). Une des particularités de ces lunettes est la reconnaissance de la main de l'utilisateur, qui permet de cacher l'interface, donnant l'illusion qu'elle est effectivement projetée à distance.

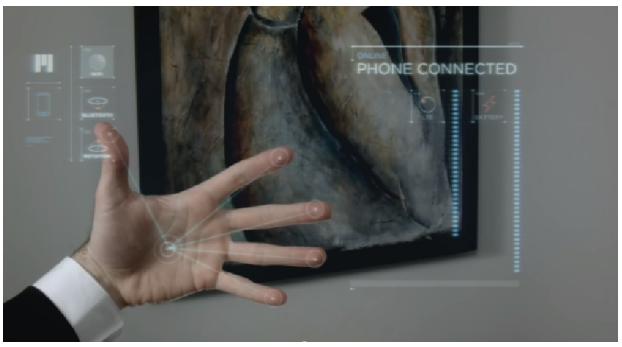

Figure 32 : Interface "holographique" des Meta SpaceGlass. Tirée du vidéo concept.

Site internet des Meta Space Glasses
https://www.spaceglasses.com/

[17] *Site internet des MetaSpace Glasses*
Lien : https://www.spaceGlasses.com/

3.2.3.9. Epson Moverio BT-200

Figure 33 : Lunettes Epson Moverio BT-200™.

Affichage :	Deux écrans 960x540 en 24 bits Champ de vision de 23° Écran de 0.42 pouces en 16:9 Équivalent à un écran de 40cm situé à 1m
Caméra :	VGA
Capteurs :	GPS Boussole Gyroscope Accéléromètre Microphone
Système d'exploitation :	Android 4.0.4 Ice Cream Sandwich

Ces lunettes stéréoscopiques sont destinées aussi bien au divertissement qu'à la réalité augmentée, et permettent un affichage en trois dimensions.

	Site internet de l'Epson Moverio BT-200 http://www.epson.fr/fr/fr/viewcon/corporatesite/products/mainunits/overview/12411

3.2.3.10. Oculus Rift

Figure 34 : Occulus Rift™ Version DK2 (2014).

L'*Occulus Rift*™ est un HMD qui n'est pas destiné à faire de la réalité augmentée. C'est, avant tout, un casque de réalité virtuelle destiné aux univers virtuels (jeux vidéos, serious game, simulation…). Il est cependant possible d'y adjoindre une caméra qui renverra des images du monde réel à l'utilisateur et ainsi réaliser de la réalité hybride.

Il y a eu plusieurs tentatives de développement de ce type de casque multimédia. Morton HEILIG a, d'ailleurs, déposé un brevet en 1960 sur un casque multimédia : le *Telesphere Mask*[18] (*Figure 35*).

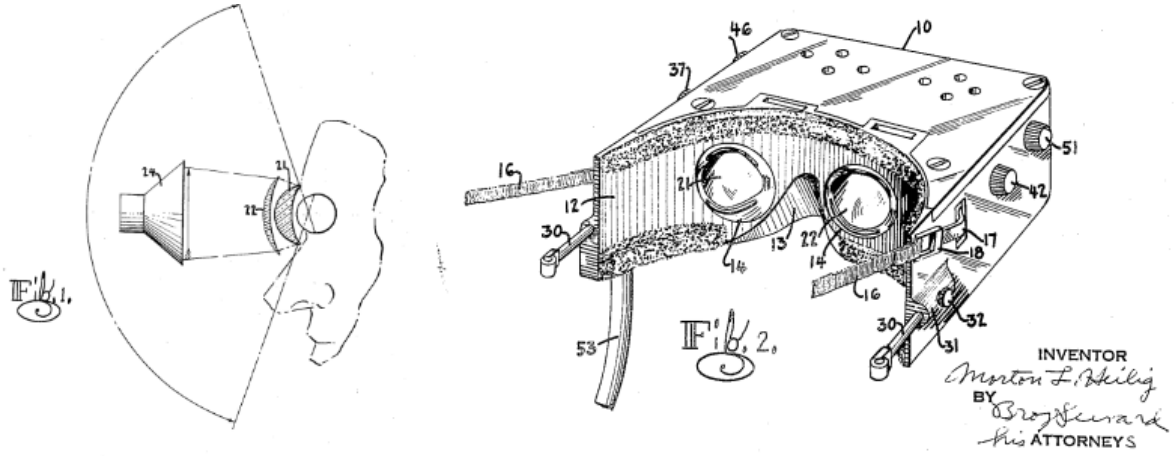

Figure 35 : Concept de Morton Heilig pour un casque télévisuel.

[18] *Brevet du TelesphereMask déposé par Morton HEILIG*
Lien : http://www.mortonheilig.com/TelesphereMask.pdf

3.3. Les défis de l'affichage en réalité augmentée

Gilles SIMON, maître de conférences en informatique à la *Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lorraine,* membre du *Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications*, décrit très bien les difficultés du rendu sur son site internet, qu'il nous a généreusement autorisé à reprendre dans le cadre ci-dessous :

Alignement des caméras réelle et virtuelle

Le problème qui revient à faire correspondre la perspective de l'objet virtuel avec celle de la scène réelle est appelé problème d'alignement des caméras réelle et virtuelle. Résoudre ce problème consiste à retrouver les propriétés de la caméra réelle ayant donné lieu à l'observation (réglages internes et point de vue par rapport à la scène), et à calculer les images synthétiques en utilisant une caméra virtuelle reprenant ces propriétés. Plusieurs techniques existent pour retrouver les paramètres réels de la caméra, à partir de capteurs ou d'indices extraits directement de l'image à augmenter. La *Figure 36.(b)* montre un exemple de résultat obtenu lorsque l'image de la voiture respecte la perspective réelle. On constate toutefois que d'avoir résolu ce problème ne suffit pas à obtenir une image réaliste : la voiture n'est pas correctement éclairée, et la partie arrière du véhicule qui devrait être occultée par le bâtiment photographié, est pourtant projetée par-dessus l'édifice.

Cohérence spatio-temporelle

Ce problème concerne les déplacements des objets virtuels dans la scène réelle (positionnement relatif, synchronisation temporelle), ainsi que les occultations et interpénétrations qui peuvent se produire entre éléments de natures différentes. La *Figure 36 (c)* montre un résultat de composition où la cohérence spatiale est prise en compte.

Cohérence photométrique

Ce problème concerne la prise en compte des inter-réflexions lumineuses (ombres, reflets) entre les scènes réelle et virtuelle. La *Figure 36.(d)* montre le résultat obtenu en tenant compte de la cohérence photométrique.

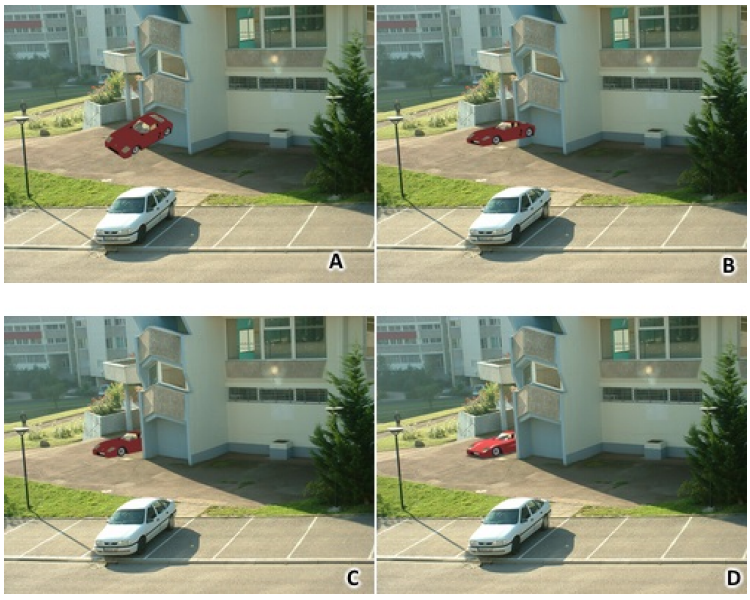

Figure 36 : Illustration de la problématique de la composition entre réel et virtuel.

(a) Intégration arbitraire.

(b) Prise en compte de l'alignement entre caméras réelle et virtuelle.

(c) Respect de la cohérence spatiale.

(d) Respect de la cohérence photométrique.

Un des problèmes, mineur cependant, présent sur la plupart des HMD proposés actuellement (excepté l'Eyetap), vient de la position de la caméra qui observe la scène à quelques centimètres du véritable point de vue de l'utilisateur (*Figure 37*). Il faut donc appliquer une correction lors du rendu du modèle afin de retrouver une cohérence lors de la superposition d'un modèle 3D sur la scène.

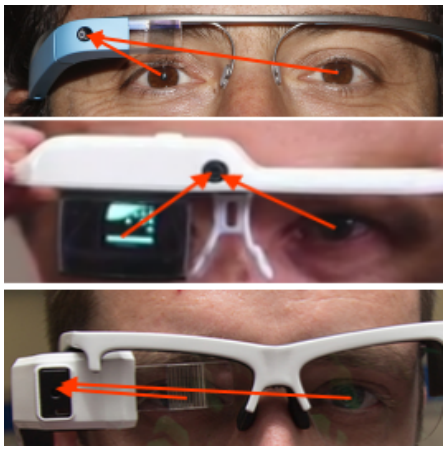

Figure 37 : Décalage entre les yeux et la caméra des HMD sur Google Glass, Laster See-Thru et Optinvent ORA-1.

3.3.1. Effet avant-plan/arrière-plan

A moins d'utiliser des techniques avancées, tous les effets affichés en RA sont en avant plan. L'environnement réel, lui, sera renvoyé en arrière-plan. Cela pose un souci de cohérence lorsqu'un objet, censé passer entre l'objet augmenté et le point de vue de l'utilisateur, se verra caché par le modèle 3D (*Figure 38*).

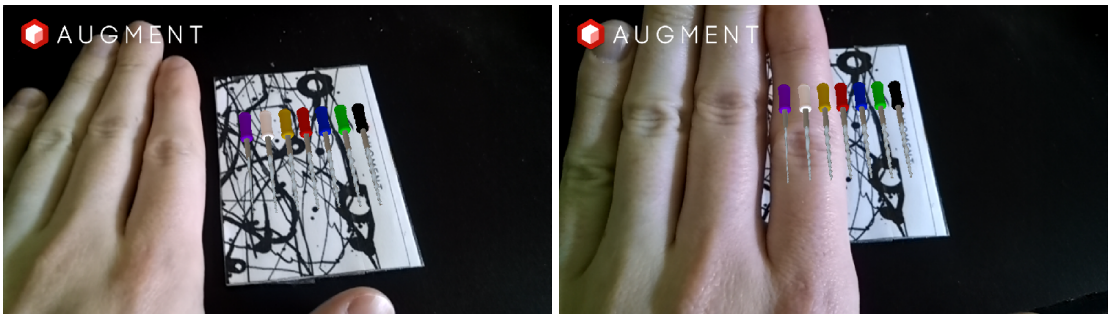

Figure 38 : Illustration de l'effet avant-plan/arrière-plan.
A gauche: Modèle 3D affiché à environ 30cm du point de vue de l'utilisateur.
A droite : Perte de cohérence au passage de la main de l'utilisateur.

Il est évident que tout l'intérêt de la RA dans notre domaine est de permettre de voir ce qui est caché. Cependant, dans certains cas, **cette perte de cohérence peut être source de distraction** vu qu'elle est, bien souvent, inattendue.

3.3.2. Latence

Tout matériel informatique, quelle qu'en soit la performance, nécessite un laps de temps pour effectuer les calculs nécessaires. Ces temps se mesurent idéalement en millisecondes (ms).

En effet, la procédure pour analyser un point de vue et projeter un rendu 3D nécessite :

- l'acquisition de l'image par la caméra ;
- l'encodage de l'image numériquement ;
- l'analyse de l'image ;
- le repérage du marqueur ;
- le rendu du modèle 3D.

Ce protocole doit être réalisé plusieurs dizaines de fois par seconde afin d'avoir un affichage fiable. Si l'acquisition de la position d'un utilisateur et/ou d'un objet se fait en croisant plusieurs données (accéléromètre, gyroscope et télémétrie par exemple), il deviendra nécessaire de **synchroniser ces données** avant de proposer un rendu, ce qui complexifie grandement les algorithmes, et donc, augmente le temps nécessaire avant le rendu final.

Ce **décalage** entre ce que perçoit l'utilisateur et le rendu en RA **peut rendre l'expérience désagréable**.

3.3.3. Mal de mer virtuel

Le mal de mer virtuel, également appelé *Cyber-Sickness*, est un **vertige entraînant des nausées** que peut ressentir un utilisateur plongé dans un monde virtuel. Ses origines ne sont pas toutes connues car les utilisateurs ne souffrent pas de la même manière en fonction des circonstances.

L'une des origines de ce mal vient d'un **décalage des informations reçues par le cerveau** via la vision d'une part, **et par l'oreille interne** d'autre part. Lorsqu'un utilisateur est plongé dans un univers virtuel et qu'il se met à bouger la tête, le matériel peut mettre un certain temps avant de capter ce mouvement et recalculer l'affichage, alors que l'oreille interne, elle, capte précisément les mouvements réellement effectués par le sujet. Il y a donc une discordance entre les sensations visuelles et les sensations d'équilibre.

Ces sensations peuvent aussi être ressenties au cinéma lors de projections en 3D stéréoscopique : si les images défilent trop rapidement avec un affichage flou, l'utilisateur ne peut plus faire le point et trouver de repère. Il peut alors se sentir entraîné dans un mouvement alors qu'il ne bouge pas physiquement. De même, ce mal peut venir du fait que l'image bénéficie uniquement d'un effet de profondeur et ne réagisse pas lorsque l'utilisateur lui même, bouge et s'attend à voir l'objet présenté sous un autre angle.

Il est possible de ressentir ce mal de mer dans les applications de réalité augmentée dès lors qu'**un utilisateur se concentre sur l'objet virtuel et non sur l'environnement**, et que l'affichage n'est pas suffisamment cohérent avec ses mouvements.

3.3.4. La stéréoscopie et la distance interpupillaire

La Distance Interpupillaire (DIP ou IPD en anglais) est la distance entre les deux pupilles. Il est important de déterminer cette distance avant de proposer une expérience de réalité altérée stéréoscopique à un utilisateur, afin d'éviter les sensations de nausées.

La distance interpupillaire, selon le sondage anthropomorphique de l'armée des États-Unis d'Amérique réalisé en 1988 (*Figure 39*), est au minimum de 52mm et au maximum de 78mm pour les hommes et 76mm pour les femmes.

INTERPUPILLARY BREADTH

FEMALES		
CM		INCHES
6.23	MEAN VALUE	2.45
.00	SE(MEAN)	.00
.36	STD DEVIATION	.14
.00	SE(STD DEV)	.00
5.20	MINIMUM	2.05
7.60	MAXIMUM	2.99
SYMMETRY---VETA I	=	.18
KURTOSIS---VETA II	=	2.97
COEF. OF VARIATION	=	5.8%
NUMBER OF SUBJECTS	=	2205

MALES		
CM		INCHES
6.47	MEAN VALUE	2.55
.00	SE(MEAN)	.00
.37	STD DEVIATION	.15
.00	SE(STD DEV)	.00
5.20	MINIMUM	2.05
7.80	MAXIMUM	3.07
SYMMETRY---VETA I	=	.20
KURTOSIS---VETA II	=	2.89
COEF. OF VARIATION	=	5.7%
NUMBER OF SUBJECTS	=	1771

Figure 39 : Tableau récapitulatif de l'étude de 1988 - Page 209[19].

Il sera inutile de faire des statistiques afin de proposer un appareil proposant une DIP moyenne, car cela ne fonctionnera pas. La seule conclusion à retenir de cette étude est qu'il peut y avoir **une grande différence entre deux utilisateurs**. Il est nécessaire de faire une calibration de l'affichage avant utilisation, sinon le **rendu sera faussé** sur, au moins, un oeil. Si la vision en trois dimensions est perturbée, alors l'appréciation des distances sera faussée, **les mouvements seront incohérents**. L'utilisateur ne sera pas capable de replacer le modèle dans son environnement car le rendu ne suivra pas ce que le cerveau s'attend à voir et ceci peut induire un mal de mer virtuel.

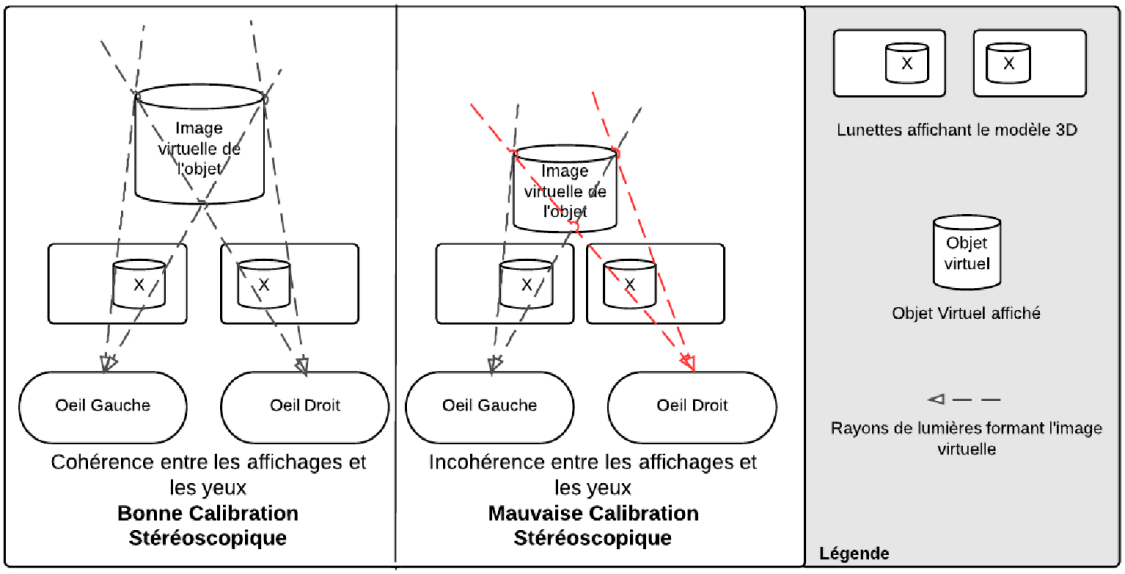

Figure 40 : Reconstitution de l'image virtuelle offerte dans le cas d'une bonne et d'une mauvaise calibration de la DIP. Alors que l'image représentée par lunettes devrait être la même, l'utilisateur de droite a un oeil droit légèrement excentré par rapport à l'ecran ce qui rendra la projection de l'image virtuelle incohérente lors de mouvements.

[19] *1988 Anthropometric survey of US army personnel : correlation coefficients and regression equations*
Lien : http://www.humanics-es.com/ADA224986.pdf

3.3.5. Contraste, transparence et luminance

Les démonstrations en RA sont souvent réalisées dans un milieu où la lumière ambiante est uniforme. En cas d'éblouissement, les caméras des dispositifs de RA, comme l'oeil humain, doivent filtrer la quantité de lumière reçue afin de restituer une image correcte. Il est alors possible de discerner les détails d'un objet auparavant surexposé mais il devient **impossible de déterminer les détails d'un objet désormais sous-exposé**.

Or, lors d'un soin, de forts contrastes apparaissent dûs à la présence de fortes sources lumineuses. Si, à forte luminosité, un HMD doit surimprimer un dessin, celui-ci doit, afin d'être discernable, être **au moins aussi lumineux que l'arrière plan**. L'affichage en HMD repose sur un certain niveau de transparence. Si les pixels affichés sont trop transparents et ne contrastent pas assez avec l'arrière plan, **l'utilisateur ne pourra pas voir le modèle affiché ou discerner des informations pourtant sous ses yeux**.

La liste des inconvénients peut paraître écrasante. Cependant, il est important de noter que nous ne sommes qu'au début de l'ère d'utilisation à grande échelle de la réalité augmentée. Comme pour tout matériel de ce genre, nous pouvons nous attendre à ce que **les améliorations se succèdent rapidement**.

4. Utilisation dans le milieu médical

4.1. Utilisation à l'Institut de Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif

L'Institut de Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif (IRCAD), situé à Strasbourg et dirigé par le Professeur Jacques MARESCAUX, réalise depuis plusieurs années des opérations assistées par la réalité augmentée.

Une fois le patient anesthésié et la calibration faite, la réalité augmentée permet de superposer, ici à l'abdomen du patient, le modèle issu du scanner, afin de placer, de façon conforme à la planification, les trocarts permettant les chirurgies mini-invasives (*Figure 41*).

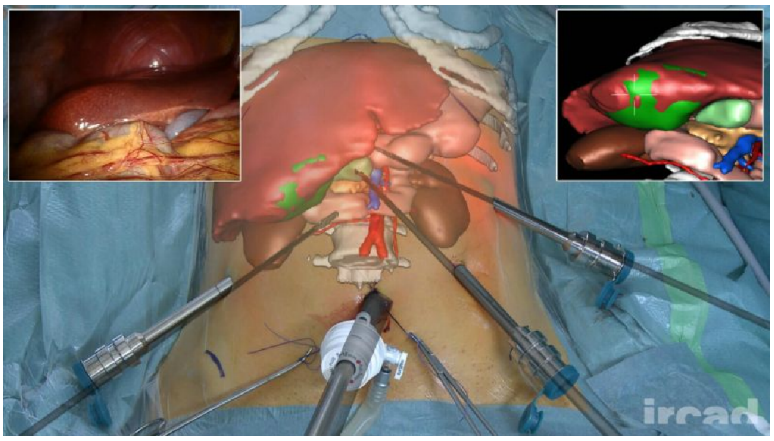

Figure 41 : Opération de résection du foie aidée de réalité augmentée en juillet 2012. Le chirurgien visualise en 3D le volume du foie qu'il souhaite découper (en vert), ainsi que les vaisseaux voisins. D'après site de l'IRCAD.

La RA peut améliorer l'expérience du chirurgien même une fois le laparoscope inséré. En effet, le modèle en trois dimensions de l'organe peut être superposé au véritable organe qui s'affiche à l'écran, permettant ainsi de mettre en évidence le volume à réséquer et les structures adjacentes. Ceci diminue les risques opératoires.

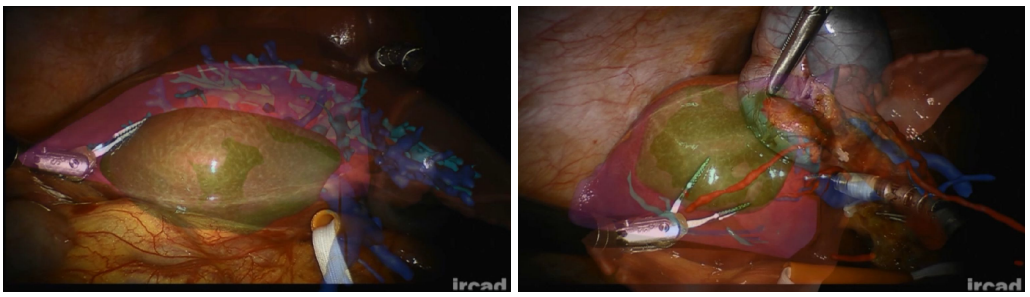

Figure 42 : Réalité augmentée durant la chirurgie mini-invasive[20].

Dans l'exemple ci-dessus, le positionnement du foie est fait manuellement par un informaticien. En effet, une fois dans la cavité abdominale, les repères sont difficiles à fixer du fait de la mobilité et la déformabilité des organes.

[20] *Site officiel de l'IRCAD*
Lien : http://www.ircad.fr/recherche/rd/VR-Planning/

Le protocole de réalisation est le suivant :

- les examens d'imagerie sont réalisés et recueillis par le laboratoire ;
- une segmentation des organes est réalisée coupe par coupe par des manipulateurs en électroradiologie médicale. Il est nécessaire que cette étape soit réalisée non pas par des informaticiens mais par des personnes issues du milieu médical ;
- un code couleur est appliqué aux modèles 3D ;
- une planification est réalisée sur le modèle virtuel ;
- le modèle 3D complet est projeté sur le patient ;
- les instruments sont placés selon la planification, l'opération peut alors débuter ;
- le modèle 3D de l'organe visé est superposé à l'organe visible sur l'image donnée par la caméra intra-abdominale ;

L'IRCAD présente l'intérêt de la RA en chirurgie sur plusieurs pages de son site Internet :

> Grâce aux images en 3D, il est possible d'avoir une meilleure connaissance de l'anatomie du patient avant les chirurgies. Les dernières technologies permettent d'avoir une copie virtuelle du patient qui peut être reconstruite avant l'intervention. Cependant durant l'intervention, les chirurgiens sont exposés à la complexe réalité de l'anatomie où les organes et les pathologies sont cachés derrière d'autres structures. De plus, contrairement au patient virtuel, les organes et les pathologies ne sont visibles qu'en nuances de rouge.
>
> Afin de repousser cette limite, la réalité augmentée offre une solution élégante qui consiste en la superposition du modèle 3D à l'image réelle filmée durant la chirurgie. L'image virtuelle identifie chaque élément anatomique et pathologique dans une couleur distincte. Le patient apparaît alors comme transparent, mais cette transparence n'est que virtuelle.
>
> En utilisant la réalité augmentée, il devient possible de positionner les instruments chirurgicaux de façon optimale. Encore mieux, en superposant l'image virtuelle 3D sur l'image réelle, les chirurgiens sont guidés durant leur manoeuvre et voient, en temps réel, les structures à opérer.
>
> Cela réduit de façon significative les risques opératoires et offre surtout la possibilité de suivre précisément la planification opératoire définie par simulation avant l'opération. Cette réalité augmentée, sorte de GPS pour chirurgie, est la première étape vers l'automatisation du geste chirurgical.

4.2. Le système Peuchot

Depuis le milieu des années 1990, Bernard PEUCHOT et son équipe du LaSMEA (Laboratoire des Sciences des Matériaux pour l'Électronique et l'Automatique) en France, travaillent sur l'élaboration d'un système de réalité augmentée destiné à être utilisé durant les opérations visant à réduire les scolioses[21] [22].

Auparavant, lors d'opérations de scolioses, les chirurgiens disposaient d'informations sur les déplacements vertébraux à réaliser et tentaient de les adapter au patient. La seule façon de valider ces déplacements était de réaliser une série d'imagerie après l'opération.

Avec ce système, en connaissant la position des processus épineux et transverses de la vertèbre, il est possible d'afficher la position complète de la vertèbre. Le chirurgien est ainsi en mesure de savoir, durant l'opération, si un déplacement est conforme à la planification (*Figure 43*). Ce système a été extrapolé à d'autres opérations en orthopédie.

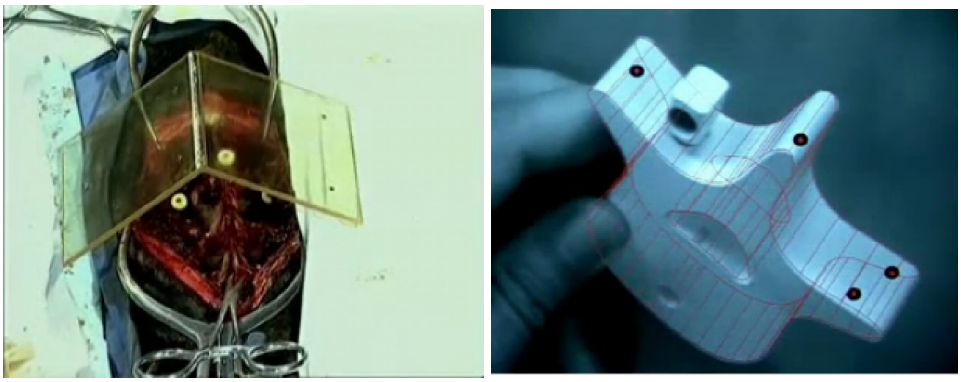

Figure 43 : Photos tirées de la vidéo de présentation du système Peuchot.
A gauche : placement des marqueurs sur la vertèbre d'un animal.
A droite : extrapolation de la forme et orientation de la vertèbre.

Cette technique a bien souvent perdu l'appellation de réalité augmentée au profit de "assisté par ordinateur" car la robotique s'invite désormais plus avantageusement dans les salles d'opérations.

4.3. Utilisation des Google Glass en salle d'opération

Aux États-Unis où se déroule actuellement la phase d'essai des Google Glass™, plusieurs médecins ont réalisé des opérations chirurgicales en portant la paire de lunettes de Google®. Ces utilisations ne relèvent pas toutes de la réalité augmentée à proprement parler, mais utilisent la réalité mixte ou la téléprésence.

---

[21] *Camera virtual equivalent model, 0.01 pixel detectors, Special issue devoted to 3D Advanced image processing in medicine / Peuchot B. - Computerized medical imaging and graphics, vol. 17, n°4/5, pp. 289-294, [1993]*
Réalité virtuelle, application à la chirurgie des scolioses / Peuchot B., Tanguy A., Eude M. - CVRMed'95 First International Conference on Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine, Nice, [1995]
Lien : http://www.cnrs.fr/Cnrspresse/n15ba3.html
[22] *Vidéo "La Réalité Augmentée" [2006]*
Lien : http://www.canal-u.tv/video/science_en_cours/la_realite_augmentee_1996.150

Le Dr. Anil Shah de l'Université de Chicago a pu tester les Google Glass™ lors d'une opération de rhinoplastie[23]. Le médecin a déclaré que l'affichage déporté au coin du champ de vision ne le gênait pas durant la procédure et lui permettait d'accéder en un seul regard à différentes informations sans avoir à lever la tête.

En août 2013, un chirurgien du centre médical Wexner de l'université de l'Ohio a retransmis une vidéo à une audience en direct, durant une opération du ligament croisé antérieur[24].

Un chirurgien orthopédiste de l'Université d'Alabama-Birmingham a été capable de filmer et transmettre en direct une vidéo de remplacement d'épaule à un collègue à plus de 160 km[25]. Ce collègue a pu prodiguer des conseils lors de l'intervention, ce qui en fait un des premiers cas de télémédecine réalisée avec les Google Glass™.

Un chirurgien de l'université de San Francisco en Californie a utilisé les Google Glass™ pour afficher des rendus et des images radiologiques durant une chirurgie[26].

Toutes les utilisations citées ici ne servent pas à démontrer l'indispensabilité d'une paire de lunettes connectées, mais simplement à mettre en avant le fait que ce matériel peut s'inviter en salle d'opération.

Les applications rapportées par les différents journaux ne sont pas en 2014, hors du commun. Par exemple, dans le cas de téléprésence, la distance importe peu car il est facile d'envoyer des vidéos en direct sur un réseau. L'exploit n'est pas la distance à laquelle la vidéo a été envoyée, mais le fait que les Google Glass™ n'ont pas gêné le chirurgien dans son travail, elles ont au contraire pu l'assister.

La jeune société *Aesthetech* a été créée en 2013 lors de la première mise à disposition des Google Glass™ pour les testeurs. Deux développeurs se sont concertés pour apporter aux chirurgiens des solutions logicielles afin de permettre l'utilisation des Glass™ au bloc opératoire. Les applications ne sont pas encore disponibles officiellement, cependant, des concepts vidéos circulent déjà (*Figure 44*).

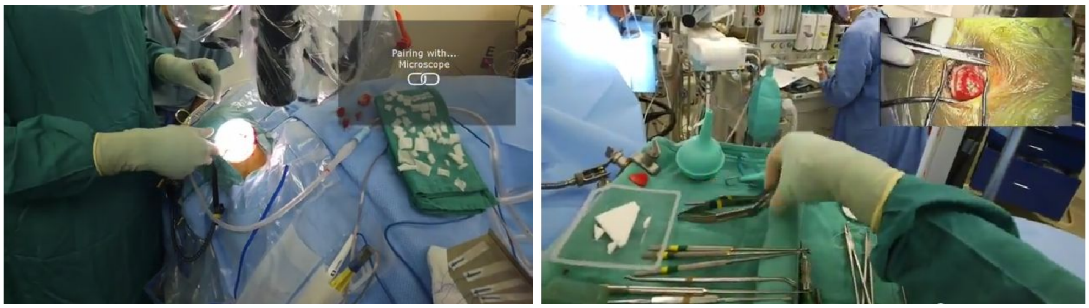

Figure 44 : Concept d'Affichage Tête-Haute (HUD) commandé vocalement avec Google Glass™.

[23] *Chicago Surgeon to Use Google Glass in Operating Room / BJ Lutz et Nesita Kwan - [2013]*
Lien : http://www.nbcchicago.com/news/tech/Google-Glass-surgery-237305531.html
[24] *Page internet "Imagine seeing a surgery live through the eyes of the surgeon…" / Ohio State University - [2013]*
Lien : http://medicalcenter.osu.edu/mediaroom/features/Pages/Google-Glass.aspx
[25] *Google Glass: Surgeons' new best friend / Time of India [2013]*
Lien : http://timesofindia.indiatimes.com/c/c/c/c/articleshow/28001598.cms
[26] *Google Glass Delivers New Insight During Surgery / Leland KIM [2013]*
Lien : http://www.ucsf.edu/news/2013/10/109526/surgeon-improves-safety-efficiency-operating-room-Google-Glass

Le groupe de travail *Droider* développant, lui aussi, des applications pour Google Glass™ a mis au point l'application *MedicAR*[27]. Celle-ci vise à apporter aux chirurgiens, apprentis ou confirmés, des informations sur les protocoles à suivre lors de procédures. A l'heure où nous écrivons ces lignes, leur première application est distribuée à un public restreint. Elle embarque une animation en trois dimensions, d'une opération que l'utilisateur peut explorer à l'aide de *Google Glass* ou d'un téléphone basé sur *Android*.

Cette application utilise un marqueur visuel tatoué temporairement sur la peau du patient (*Figure 45*).

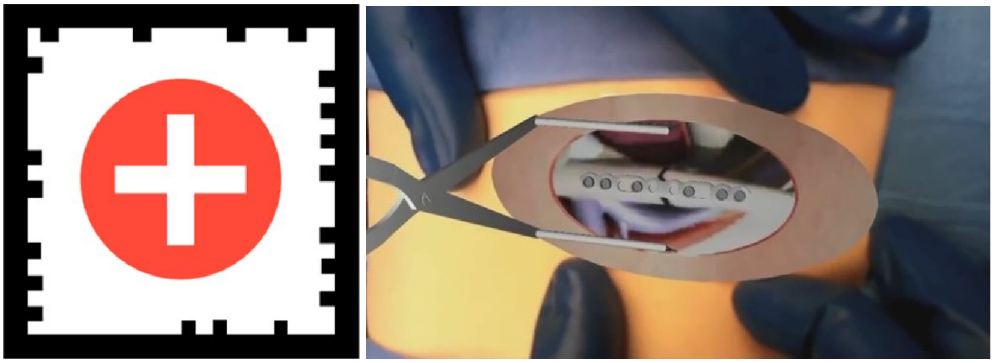

Figure 45 : A gauche: Marqueur tatoué sur la peau du patient .
A droite : Réalité augmentée propulsée par l'application MedicAR via Google Glass™.

4.4. Des lunettes pour voir les cellules cancéreuses

Des lunettes spéciales permettent de voir des cellules cancéreuses marquées, afin d'augmenter l'efficacité des interventions visant à les extraire. Le passage suivant est traduit de l'anglais, d'après l'article de l'université Washington à St Louis[28].

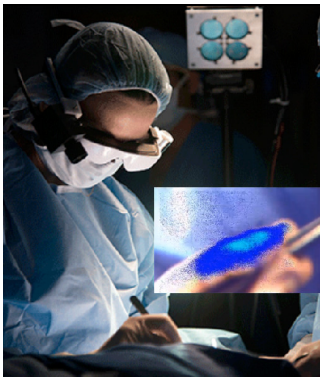

Figure 46 : Photo de Robert Boston - Washington University School.

Les cellules cancéreuses sont connues pour être difficiles à percevoir, même avec un fort pouvoir grossissant. Ces lunettes ont été créées afin de faciliter la tâche des chirurgiens pour différencier les cellules cancéreuses des cellules saines, éviter qu'il ne reste des cellules tumorales après la chirurgie, et diminuer le risque de récidives.

[27] *Portfolio d'applications du groupe DROIDERS*
Lien : http://www.droiders.com/portfolio/
[28] *Special glasses help surgeons 'see' cancer - Washington University in Saint-Louis*
Lien : https://news.wustl.edu/news/Pages/26496.aspx

“Nous sommes aux premiers stades de développement de cette technologie et plusieurs autres tests sont encore nécessaires, mais nous pouvons déjà être encouragés par le bénéfice potentiel pour les patients” a déclaré le chirurgien mammaire Julie Margenthaler, une professeure associée à l’université de Washington qui a réalisé l’opération. “Imaginez ce que pourraient nous apporter ces lunettes si elles éliminent le besoin d’une seconde intervention avec les douleurs, les troubles et l’anxiété associés.”

Ces lunettes pourraient réduire les besoins d’opérations chirurgicales supplémentaires, diminuer l’anxiété chez les patients, et permettre un gain de temps et d’argent.

Le Pr Margenthaler déclare qu’environ 20 à 25 pour cent des cancers du sein dont les nodules ont été retirés, nécessitent une seconde opération, car la technologie actuelle ne permet pas de connaître l’étendue d’une lésion cancéreuse durant la première chirurgie.
“Nous espérons que cette nouvelle technologie réduira l’étendue ou idéalement éliminera le besoin d’une seconde chirurgie.”

Cette technologie, développée par une équipe dirigée par Samuel Achilefu, professeur de radiologie et d’ingénierie biomédicale à l’université de Washington, incorpore des technologies vidéos personnalisées, un affichage tête haute et un agent moléculaire attaché aux cellules cancéreuses les rendant fluorescente quand elles sont regardées à travers ces lunettes.

Dans l’étude publiée dans le Journal d’Optique Biomédical, les chercheurs ont noté que des tumeurs d’un millimètre pourraient être détectées.

Le docteur Ryan Fields, professeur assistant au poste de chirurgie de l’université de Washington, prévoit de porter ces lunettes quand il retirera un mélanome d’un patient. Il déclare qu’il accueille favorablement cette nouvelle technologie car elle pourrait potentiellement être utilisée pour visualiser n’importe quel type de cancer.
“Une des limites de la chirurgie consiste en le fait qu’il n’est pas toujours facile à l’oeil nu de différencier les tissus sains des tissus cancéreux. Avec les lunettes développées par le Dr. Achilefu, nous pouvons mieux identifier les tissus à extraire.”

Dans une étude pilote conduite sur des souris, les chercheurs ont utilisé le vert d'indocyanine, un agent de contraste approuvé par la *Food and Drug Administration*. Quand cet agent est injecté dans la tumeur éclairée avec une lumière de longueur d’onde déterminée, les cellules cancéreuses fluorescent.

Le docteur Achilefu, professeur de biochimie et biophysique moléculaire qui co-dirige l’*Oncologic Imagin Program at Siteman Cancer Center*, cherche actuellement l’approbation de la *Food & Drug Agency* pour utiliser un autre agent moléculaire compatible avec ces lunettes. Cet agent cible précisément ces cellules et y stagne plus longtemps.

“Cette technologie a un grand potentiel pour les patients et les professionnels de santé” déclare Achifelu, “Notre but est d’être certains que nous ne laissons pas de cellules cancéreuses derrière notre intervention.”

Le Dr Achilefu a travaillé avec le bureau de Gestion des Technologies de l’université Washington et est en attente d’un brevet.

La recherche est financée par le National Cancer Institute (*R01CA171651) du National Institutes of Health (NIH)*

4.5. Réalité augmentée pour combattre les douleurs dues aux membres fantômes

Une équipe suédoise a mené une expérience utilisant la réalité augmentée dans le but de combattre les douleurs liées aux membres fantômes chez un amputé[29]. Dans ce phénomène, le patient ressent la présence du membre perdu, qui garde toujours une représentation dans le cerveau. Lorsque ce membre fantomatique entre en conflit avec le reste du corps, le patient peut ressentir des sensations, souvent des douleurs.

Une technique, encore peu répandue, visant à alléger ces douleurs, consiste à tromper le cerveau en lui affichant un membre valide à la place de ce membre perdu. Pour ce faire, un miroir est placé sur le membre amputé. Le patient, regardant le miroir, voit le reflet de son membre valide[30]. La réalité virtuelle a tenté de remplacer le miroir afin de proposer une solution plus élégante, plus souple, interactive et ludique. Mais cette technique s'est d'abord basée sur le reflet d'un membre valide, ce qui exclut tous les amputés bilatéraux.

L'équipe suédoise a tenté d'utiliser la réalité augmentée afin de proposer une représentation, aussi correcte que possible, du membre perdu. Ce test repose sur le *Target Achievement Control* (TAC), qui consiste à mettre une prothèse d'un patient dans une certaine position et lui demander d'atteindre et maintenir une position cible[31] (*Figure 47*).

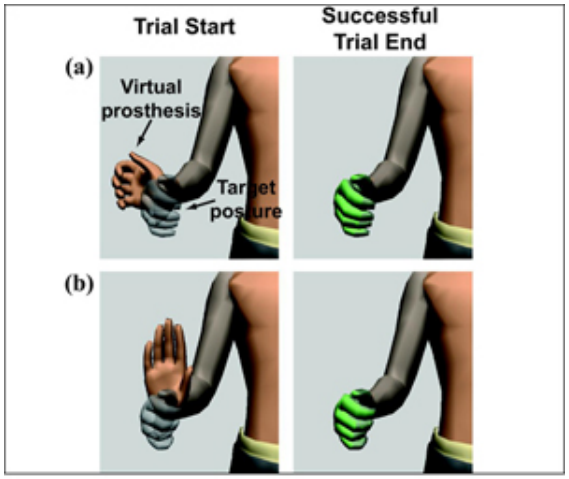

Figure 47 : Target Achievement Control. La main prothétique de l'utilisateur est placée dans la configuration à gauche. L'utilisateur a réussi le test si il atteint et maintient la position à droite.

[29] *Treatment of phantom limb pain (PLP) based on augmented reality and gaming controlled by myoelectric pattern recognition: a case study of a chronic PLP patient / Max ORTIZ-CATALAN, Nichlas SANDER, Morten B. KRISTOFFERSEN, Bo HAKANSSON et Rickard BRANEMARK [2014]*

[30] *Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors / V. RAMACHANDRA et D. ROGERS-RAMACHANDRA (1996). "". Proc. Biol. Sci. 263, 377–386. doi: 10.1098/rspb.1996.0058*

[31] *Target achievement control test: evaluating real-time myoelectric pattern-recognition control of multifunctional upper-limb prostheses / A.M. SIMON., L.J. HARGROVE, B.A. LOCK et T. KUIKEN. [2011]. J. Rehabil. Res. Dev. 48, 619–628. doi: 10.1682/JRRD.2010.08.0149*

Un marqueur visuel a été utilisé et des électromyogrammes (EMG) placés sur l'extrémité du membre du sujet (*Figure 48*). Le sujet, un homme de 72 ans amputé en 1965 de l'avant-bras, juste en dessous du coude, présente une douleur permanente du membre fantôme. Il décrit une sensation de brûlure d'intensité 3, sur une échelle de douleur de 0 à 10. Le patient, bien qu'amputé, continuait à réaliser des tâches agricoles à l'aide de sa prothèse.

Une fois le membre virtuel affiché, il était demandé au sujet de réaliser des mouvements "comme si son membre était encore là". Les EMG enregistraient les contractions musculaires qui étaient ensuite envoyées à l'ordinateur lequel déduisait la représentation du mouvement. Le patient avait alors le devoir de réaliser certaines tâches avec son membre virtuel en utilisant le *Target Achievement Control*.

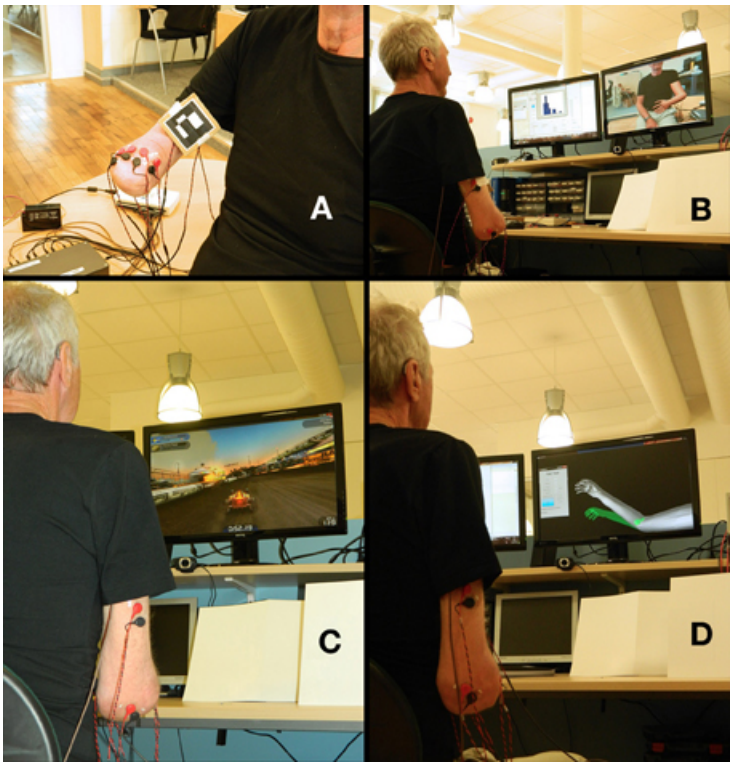

Figure 48 : Photos tirées de l'étude. (A) Électrodes et marqueur situés au niveau du moignon. (B) Environnement et utilisateur capturés par la caméra et affichage du membre virtuel (C) Patient jouant à un jeu de course utilisant son membre fantôme (Trackmania Nations Forever, version gratuite). (D) Patient utilisant le Target Achievement Control (TAC) comme test de réhabilitation.

L'équipe et le patient ont constaté, après une période très courte de hausse, une diminution de la douleur dès quatre semaines d'utilisation.

D'après le patient, le membre fantôme était en position poing rigoureusement fermé et ce depuis 48 ans. Après six sessions, ce statut a évolué en un poing à moitié ouvert, ce qui coïncide avec la position neutre, relâchée, de la main. Cette position correspond à celle affichée en réalité augmentée, et c'est cette position qui est désormais toujours ressentie par le patient.

L'utilisation de réalité augmentée a permis de diminuer, voire de faire disparaître, les douleurs dues au membre fantôme.

4.6. Réalité augmentée pour la pose de brackets d'orthodontie

L'utilisation en orthodontie a été explorée par une équipe en collaboration avec le groupe White Lion Technologies AG de Munich en Allemagne[32]. Leur approche a permis de mettre au point un système capable d'analyser une image et d'y superposer le scanner du patient. Il a été ainsi possible de placer des brackets d'orthodontie, en accord avec la planification initiale.

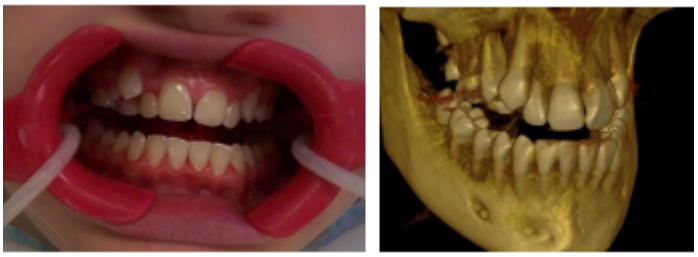

Figure 49 : À gauche: vue exobuccale du patient.
À droite : Modèle issu de l'imagerie 3D.

Pour cette expérience, l'équipe a opté pour une calibration par reconnaissance à la fois des contours et des textures, ainsi qu'une superposition avec un rendu rapide du scanner (*Figure 50)*, le tout à l'aide d'un ordinateur.

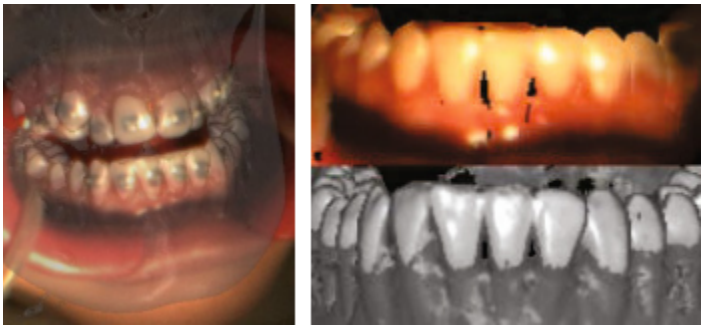

Figure 50 : Reconnaissance des contours et textures et résultat en réalité augmentée
À gauche : superposition entre la vue exobuccale et le modèle comportant la planification.
En haut à droite : l'image prise par la caméra après traitement pour déterminer les formes et la texture.
En bas à droite : le rendu du scanner correspondant à la prise de vue.

Afin de garantir la réactivité du système, sur le modèle virtuel seul l'émail bénéficiait d'un rendu différent du reste du modèle, qui était unifié et rendu dans une seule texture.

[32] *Image-Based Tracking of the Teeth for Orthodontic Augmented Reality / André AICHERT, Wolfgang WEIN, Alexander LADIKOS, Tobias REICHL et Nassir NAVAB - [2012]*

5. Didacticiel de conversion d'un examen d'imagerie CBCT en RA

Afin d'explorer les possibilités offertes par la RA dans le domaine dentaire, nous avons tenté de concevoir une expérience de réalité augmentée sur un sujet. Pour cela, nous avons sélectionné un patient (ici, un membre de ma famille) ayant à disposition un examen d'imagerie en trois dimensions : un scanner dans le cas présent. Le but était de replacer un modèle de maxillaire en trois dimensions issu d'un scanner, sur le visage du sujet. Nous nous sommes tourné vers une utilisation d'un smartphone pour les rendus, pour plusieurs raisons :

- l'expérience se rapproche des HMD, qui seront le matériel de choix pour les chirurgiens-dentistes ;
- le smartphone offre une plus grande maniabilité ;
- les applications disponibles sont de très bonne qualité.

Pour la réalisation de cette expérience nous avons utilisé :

- un ordinateur personnel pour la conversion et réalisation des modèles ;
- deux terminaux mobiles de 2013 et de 2011 pour les affichages en réalité augmentée.

5.1. Choix des logiciels utilisés

5.1.1. Augment

Figure 51 : Logo de l'application AUGMENT.

Pour le rendu des modèles en réalité augmentée, nous avons opté pour l'application *Augment*, développée dès 2011 par une équipe de six développeurs français.

Nous avons choisi ***Augment*** pour les raisons suivantes :

- l'application est gratuite ;
- elle est disponible sur Android™ et iOS™, ce qui devrait couvrir plus de 90% des utilisateurs de smarphone en 2014[33] ;
- l'application permet de scanner des QR codes donnant accès à une bibliothèque en ligne ou permettant de charger des modèles à partir de la mémoire du téléphone ;
- l'interface est intuitive ;
- Les performances de rendu et du tracking sont excellentes.

La prise de repères peut se faire de plusieurs manières :

- Utiliser les marqueurs proposés par le développeur, au format A4 ou format poche (*Figure 52*) ;
- Créer un traqueur soi-même en scannant une image ;
- Utiliser le mode sans traqueur, ce qui forcera le téléphone à utiliser uniquement le gyroscope, l'accéléromètre et des repères déterminés automatiquement pour repérer les mouvements de l'utilisateur, mais non du sujet observé.

[33] *Chiffres-clés : les OS pour smartphones - Zdnet*
Lien : http://www.zdnet.fr/actualites/chiffres-cles-les-os-pour-smartphones-39790245.htm

Figure 52 : Marqueur de poche proposé par AUGMENT.

Les rendus en réalité augmentée ont été réalisés sur mon téléphone personnel, à savoir un Motorola® Moto X™ de 2013, tournant sous Android™ 4.4.2 et équipé d'un processeur Qualcomm© Snapdragon™ 1.70 GigaHertz , 2 GigaOctets de mémoire vive, une caméra de 10 MégaPixels pour une résolution d'écran de 720*1280 pixels en portrait.

Afin de tester les performances de l'application et du matériel, nous avons créé un ensemble de modèles de plus en plus complexes, sans dépasser la limite de 400 000 polygones, imposée par le logiciel. Nous avons testé ces modèles sur plusieurs appareils mobiles, dont deux datant de 2011 et deux de 2013. Les mesures des performances ont été réalisées grâce à l'application "FPS Counter", pour Android, nécessitant un accès racine (root), et rassemblées dans le tableau ci-dessous. Ces mesures s'expriment en **Image Par Seconde (IPS)** et sont pondérées par le ressenti de l'utilisateur.

Attention, il n'est pas question de mesurer les performances de l'application, mais bien de l'ensemble matériel + logiciel : le logiciel de mesure ne peut rapporter que les performances finales de l'expérience utilisateur et non la rapidité du rendu.

Nombre de polygones	Appareils de 2013	Appareils de 2011
8	Très fluide - 48 IPS	Acceptable - 25 IPS
30 000	Très fluide - 48 IPS	Passable - 15 IPS
216 257	Très fluide - 41 IPS	Passable - 15 IPS
394 482	Très fluide - 40 IPS	Impossible de charger le modèle

Cependant, l'application ne supporte que les **modèles surfaciques**, alors que les examens d'imagerie sont **volumiques**, ce qui nous a poussé à faire des conversions et utiliser les logiciels suivants.

5.1.2. InVesalius

InVesalius 3.0.0 Beta 4 a été utilisé pour extraire des modèles surfaciques à partir des *DICOM*. Nous l'avons choisi pour plusieurs raisons :

- le logiciel est gratuit et disponible librement ;
- il est disponible en version 64bits ce qui permet d'utiliser une plus grande quantité de mémoire ;
- son interface est claire, fluide et très sobre ;
- les exportations en .STL sont possibles.

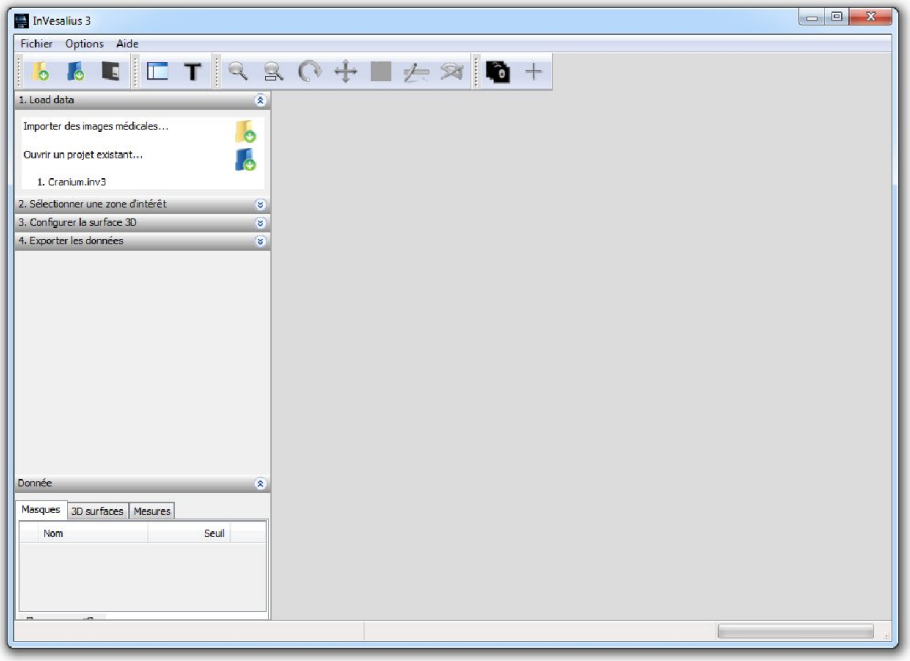

Figure 53 : Écran d'accueil de inVesalius 4 beta 3 sous Windows 7™ 64bits.

Ce logiciel présente cependant quelques inconvénients :

- l'extraction du modèle est réalisée par le processeur, ce qui rend la procédure très longue dans certains cas. Il est théoriquement possible d'utiliser la carte graphique pour ce travail, mais toutes nos tentatives se sont soldées par un échec ;
- les modèles ne sont pas optimisés à la sortie : le nombre de polygones est bien souvent gigantesque et la plupart de ceux-ci ne contribuent pas à la précision du modèle à l'échelle humaine.

5.1.3. Blender

Figure 54 : Logo de l'application Blender™.

Blender™ est un logiciel *OpenSource*, disponible gratuitement, permettant la création et la manipulation de modèles 3D. Ce logiciel a été utilisé aussi bien pour la mise en évidence que pour l'optimisation des modèles.

L'équipe de développement d'*Augment* a mis à disposition un plugiciel pour *Blender*™ permettant très simplement d'exporter les modèles directement depuis le logiciel de modélisation, vers la bibliothèque en ligne. Une fois le module activé dans les paramètres, une nouvelle interface s'incruste dans le menu latéral (*Figure 55*), permettant d'envoyer le modèle sur la plateforme en ligne. Le modèle sera ensuite accessible dans l'application *Augment* sur smartphone.

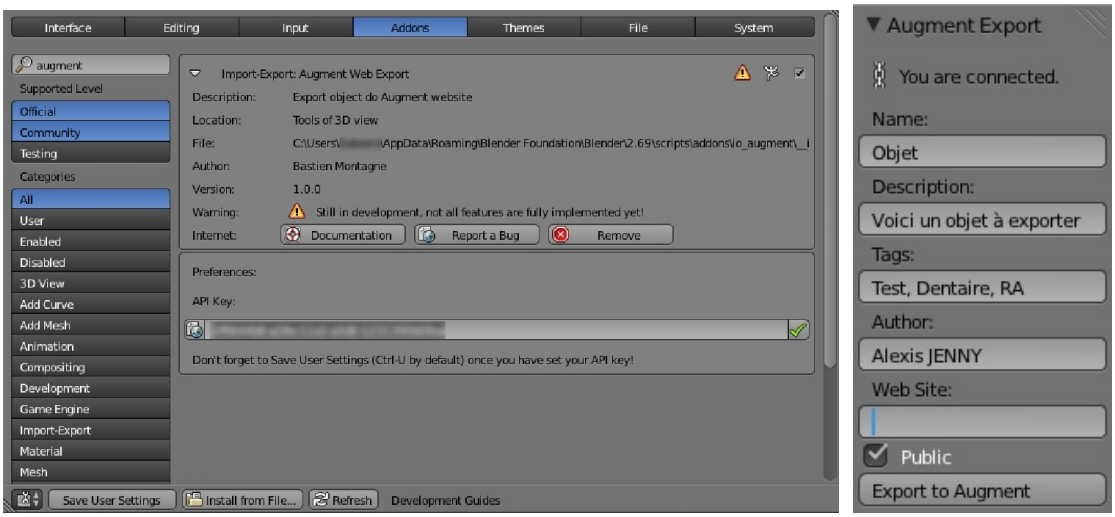

Figure 55 : À gauche : Interface d'ajout du plugiciel Augment pour Blender™ 2.69.
A droite : Interface latérale permettant d'envoyer les modèles dans la bibliothèque en ligne du logiciel.

5.1.4. Les formats

5.1.4.1. Le DICOM et les formats volumiques

Le *DICOM* (Digital Imaging and COmmunications in Medicine) est un format de fichier utilisé en médecine afin de stocker des informations médicales sous forme numérique. Il a été présenté en 1985 par l'*American College of Radiology* (ACR) et la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) afin de promouvoir un format standard qui facilite l'interopérabilité des systèmes.

Dans notre profession, nous retrouvons le format *DICOM* dans les examens de *Cone Beam Computed Tomography* (CBCT) et scanners. Le format *DICOM* contient les informations de chaque épaisseur de coupe d'une tomographie dans un fichier différent, l'épaisseur étant déterminée par l'appareil servant à réaliser l'image. Pour un examen sur un même volume, plus l'épaisseur de coupe est fine, plus le nombre de fichiers est important et meilleure sera la précision.

L'épaisseur est importante car les informations contenues dans ces coupes sont moyennées et étendues à l'épaisseur. Si, dans un même voxel (pixel en 3 dimensions) des structures de densités différentes sont présentes, l'intégralité du voxel aura une densité moyenne, ce qui donne l'effet de volume partiel[34]. Ceci peut nous poser des problèmes lors de la segmentation d'un modèle. En effet l'émail, tissu dur par excellence, est proche d'une zone vide, la cavité buccale. Un voxel qui englobe de l'émail et du vide aura une densité moyenne qu'il sera nécessaire d'inclure dans le masque, et nous aurons forcément un volume rendu supérieur au volume véritable.

Nous aurons ainsi des nuances de densité, représentées par différents tons de gris, se projetant dans un volume, l'épaisseur de coupe. Nous avons donc des informations **volumiques** : les voxels.

Lorsqu'un logiciel découvre un fichier *DICOM*, il replace les différentes coupes dans l'ordre. Nous nous retrouvons ainsi avec différentes informations de densité empilées. Pour reformer le modèle en trois dimensions, les logiciels nous permettent de sélectionner un "masque" qui permet d'afficher uniquement une fourchette de densités exprimées en unité Hounsfield.

5.1.4.2. Les formats surfaciques : .STL et .OBJ

Les formats de fichier .STL (STereoLithograph) et .OBJ (objet) servent à stocker des modèles en trois dimensions. Ce format décrit les positions géométriques de points ou sommets, appelés Vertex, composant la surface de l'objet. Nous avons donc un modèle dit surfacique qui, au contraire du format volumique, ne peut contenir d'informations sur son contenu.

Ce format ne contient pas d'information sur les couleurs, textures et opacité de l'élément en trois dimensions. Ces informations peuvent être attachées dans un fichier texte indépendamment du modèle.

[34] *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie / J.P Dillenseger, E. Moerschel. Edition MASSON, Page 132*

5.2. Réalisation et préparation du modèle

5.2.1. Segmentation et exportation

Nous commençons par ouvrir l'examen en DICOM dans le logiciel InVesalius (*Figure 56*).

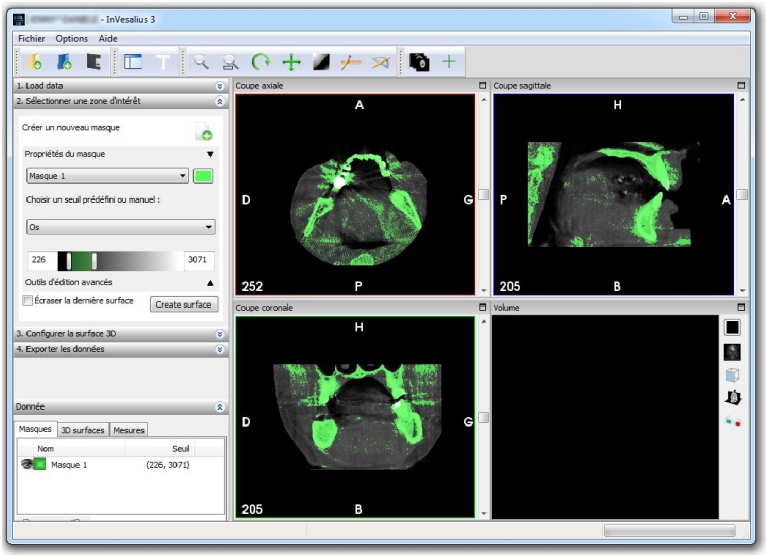

Figure 56 : Ouverture du fichier DICOM.

La première étape de réalisation d'un modèle prêt à être utilisé en réalité augmentée est la segmentation consistant à n'afficher qu'une fourchette de densité (*Figure 57*). L'examen d'imagerie est enregistré généralement en *DICOM*, un format nous donnant un modèle volumique. Les logiciels de visualisation permettent de sélectionner plusieurs fourchettes de densité que nous pourrons exporter successivement dans un format de fichier surfacique.

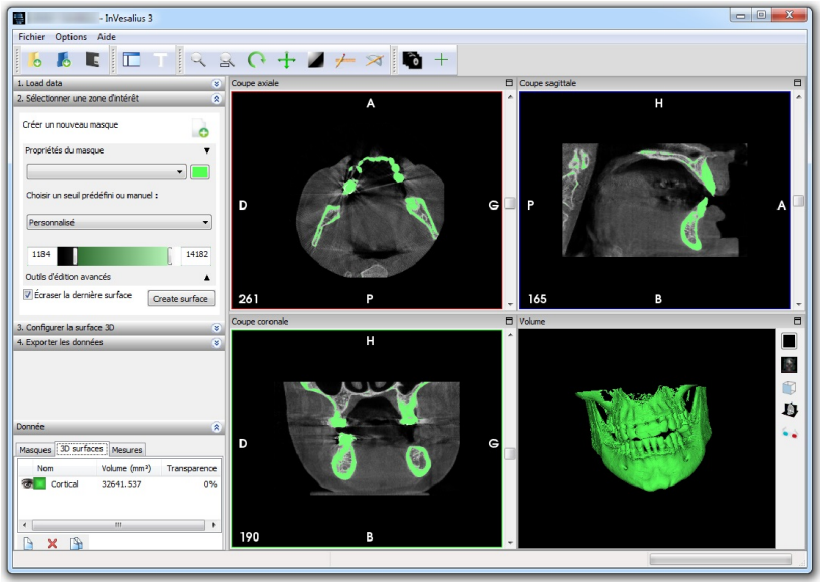

Figure 57 : Sélection de la fourchette correspondant à l'os cortical.

Nous devrons donc isoler et créer les surfaces des densités pertinentes : os cortical, os spongieux, émail, dentine (*Figure 58*). Il est souvent difficile de sélectionner une fourchette de densité sans créer de débris autour des structures. Il est donc plus intéressant de prendre au premier abord une fourchette plus large que nous nettoierons par la suite, plutôt que de sélectionner un volume moindre.

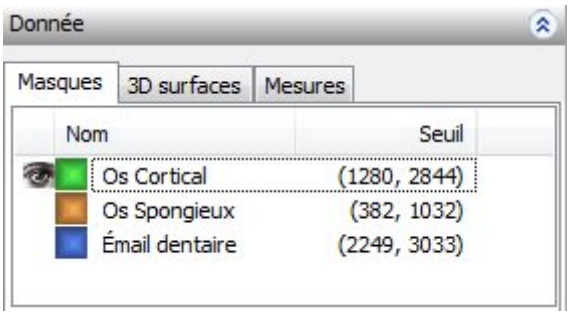

Figure 58 : Exemple de sélection de différents masques dans InVesalius 3b4.

L'exportation (*Figure 59*) se fera successivement en un format compatible avec une application d'édition de modèle 3D : le .STL ou le .OBJ sont pris en charge par la plupart des logiciels.

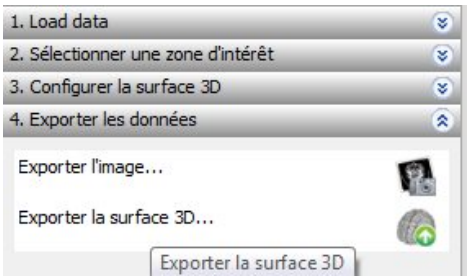

Figure 59 : Interface d'exportation de fichier.

La création des modèles surfaciques est longue, de par l'utilisation préférentielle du processeur, et peut aisément bloquer une machine. Il est possible d'exploiter une carte graphique, beaucoup plus rapide, mais les nombreuses erreurs dues à ce rendu nous ont poussé à rester sur un rendu processeur.

5.2.2. Importation dans Blender

L'importation des différents modèles se fera successivement dans *Blender*™ via l'interface embarquée.

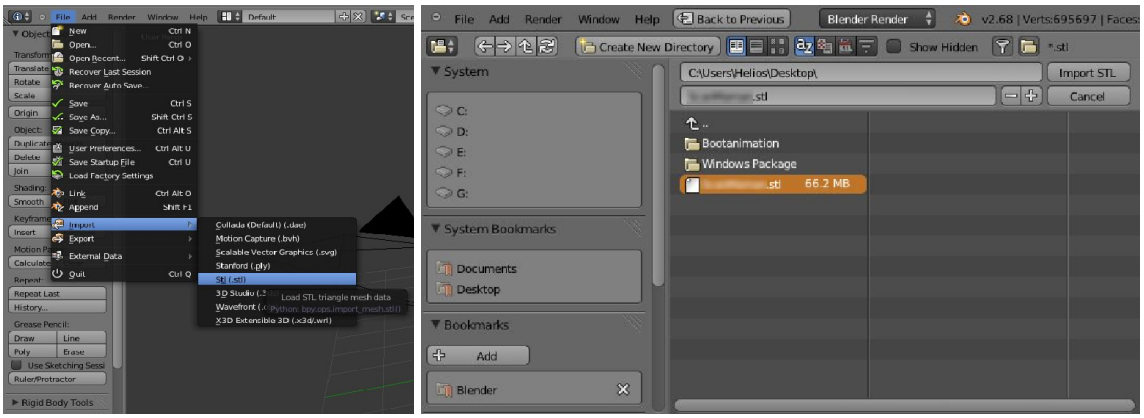

Figure 60 : Interface d'importation du fichier STL.

La première chose à faire est de replacer le centre de l'objet dans le centre géométrique, de façon à pouvoir manipuler l'objet plus aisément. En effet lors de l'importation, l'objet est situé hors de la matrice de base de *Blender*™ et son origine, qui est un point de référence pour les manipulations, est complètement décalée. Il faut donc réinitialiser les coordonnées de ce point. Pour cela, il suffit de sélectionner le modèle (clic-droit par défaut dans *Blender*™ 2.69) puis, dans le menu latéral gauche, cliquer sur *Origin* puis *Origin to Center of Mass* (*Figure 61*).

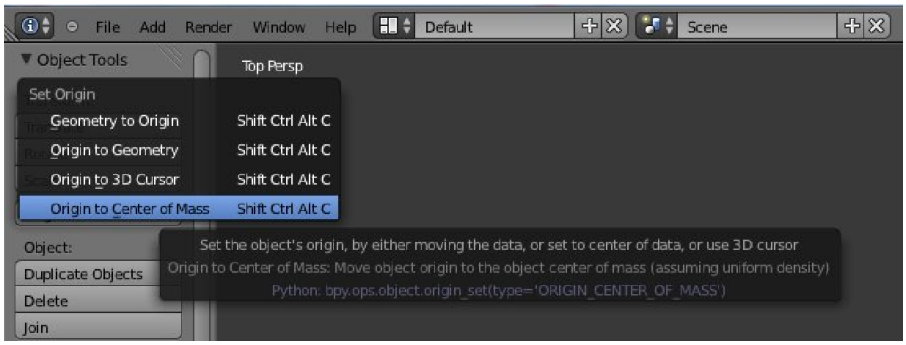

Figure 61 : Correction du centre de l'objet.

Ensuite, nous pourrons replacer le modèle sur le plan de base en modifiant les coordonnées de son origine et réduire les dimensions de l'objet, car par défaut, la taille du modèle dépasse la matrice de référence de *Blender*™. Une taille de 10% permet généralement d'avoir un modèle d'une taille habituelle. Pour effectuer ces opérations, il faut sélectionner le modèle puis tirer le panneau latéral droit qui est symbolisé par un *(+)* et corriger les champs correspondant à "*Location*" et "*Scale*" (*Figure 62*).

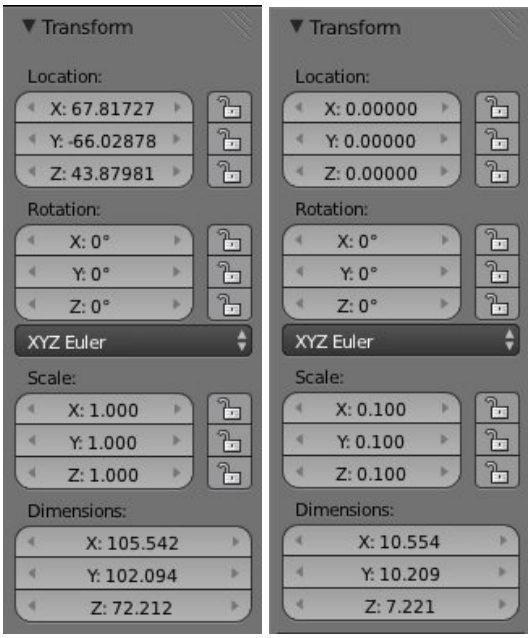

Figure 62 : À gauche : les valeurs de base du modèle. À droite : les valeurs corrigées.

Nous pourrons ensuite nettoyer le modèle (*Figure 63*) en passant en mode *EDITION* (touche Tabulation par défaut) puis en sélectionnant et supprimant les vertex. Cette opération pourra être répétée plusieurs fois en changeant l'axe de la caméra.

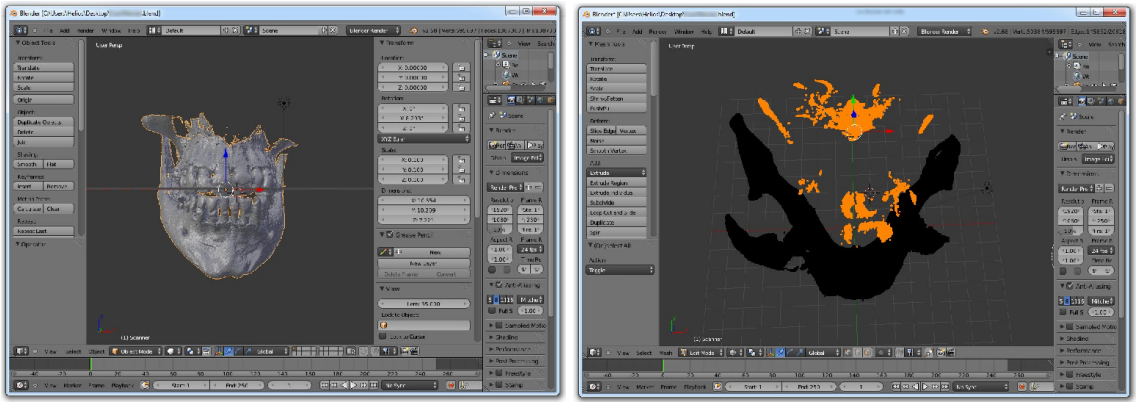

Figure 63 : À gauche : Modèle centré et réduit.
À droite : Début du nettoyage du modèle par sélection large des vertex.

La procédure sera répétée autant de fois que nécessaire pour chaque modèle importé jusqu'à l'obtention d'une superposition complète.

5.2.3. Optimisation

La transformation d'un modèle issu d'un scanner optique ou radiologique en un modèle surfacique crée énormément de polygones de très petite taille. Il est donc obligatoire d'optimiser avant l'utilisation en RA, d'une part parce que ces polygones ne participent plus à la précision du modèle (ils sont quasiment contigus et l'oeil nu ne peut pas faire la différence), et d'autre part parce qu'ils alourdissent considérablement le poids du fichier.

L'affichage d'un modèle riche en polygones peut poser un certain nombre de problèmes lors d'un rendu : micro-pause, ralentissement voire même blocage de l'appareil. Il est donc indispensable d'optimiser le modèle que nous avons créé. Le modèle servant d'exemple comprend uniquement l'exportation de l'os cortical. Il comprend 1 387 303 polygones avant optimisation (*Figure 64*).

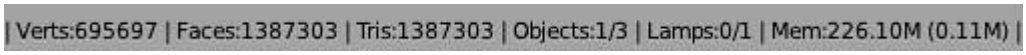

Figure 64 : Compte rendu de Blender sur le nombre de polygones (Faces), avant optimisation.

Il est possible d'optimiser ce nombre de polygones simplement, en appliquant des transformations, dont le ***Decimate*** et le ***Remesh*** (*Figure 65*).

L'opérateur *Decimate* servira à diminuer le nombre de polygones. Il nous suffira de renseigner le pourcentage de simplification, dans notre cas 40%, et le modifieur fera l'opération.

L'opérateur *Remesh* permet de rétablir un maillage plus ordonné. Cette fois-ci, il nous faudra choisir la complexité du maillage voulu. Pour ces modèles-là, nous avons opté pour un mode "*Smooth*", un *Octree Depth* de 8 et un *Scale* de 0,9. Ces paramètres là respectaient au mieux la forme du modèle tout en gardant un maillage simple.

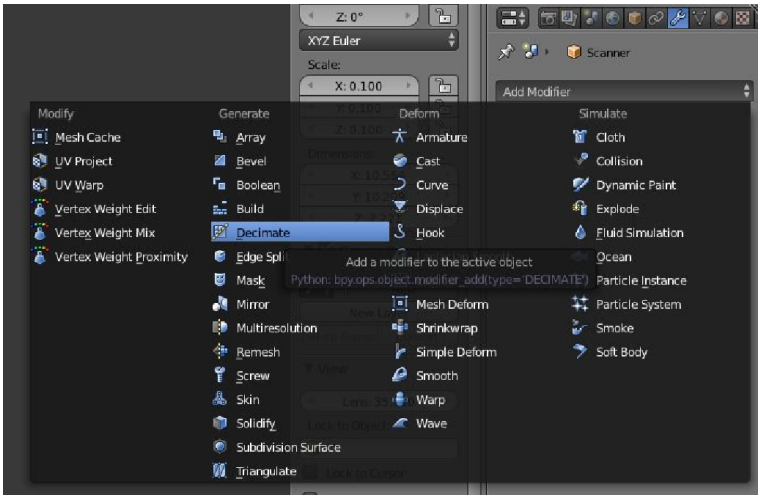

Figure 65 : Sélection du modifieur Decimate. Le modifieur Remesh se trouve cinq lignes plus bas.

Après une seule utilisation de ces deux opérateurs, nous avons pu diminuer de 70% la complexité du modèle (*Figure 66)*. Nous pouvons encore diminuer le nombre de polygones en renouvelant le procédé, mais il sera utile de surveiller le résultat afin que la baisse de qualité du modèle ne soit pas gênante.

Figure 66 : Compte rendu de Blender™ sur la complexité du modèle après optimisation. Cette procédure nous a fait économiser près de 800 000 Faces.

5.2.4. Mise en évidence

Par défaut, les modèles importés apparaissent sans texture. Si nous faisions un rendu tel quel, les modèles se révéleraient gris. Il faut donc adjoindre une texture aux objets afin que, lors du rendu final, ils soient discernables les uns des autres. Pour ce faire, il faut sélectionner un modèle, aller dans l'onglet *Matériau* → *Ajouter un matériau (+)* → Choisir la couleur qu'il diffusera (*Figure 67*).

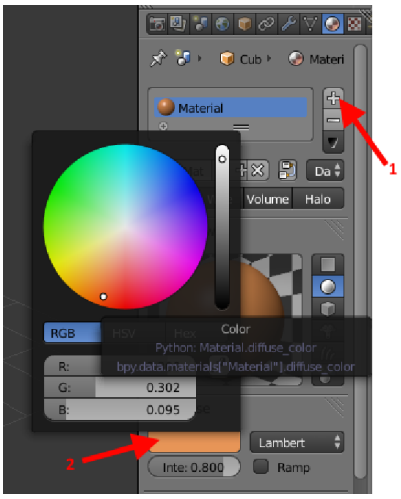

Figure 67 : Application d'un matériau à un objet.
En 1, le bouton d'ajout de matériau, en 2 le bouton de choix de la couleur.

Si nous désirons appliquer plusieurs matériaux à un modèle, nous pouvons le faire en passant en mode *Édition* (Touche de raccourci : Tabulation). Nous sélectionnons alors quelques surfaces sur le modèle avec le curseur. La sélection par groupe peut aider (Touche de raccourci : C). Puis, dans l'onglet *Matériau,* nous pouvons ajouter un matériau et y assigner les surfaces sélectionnées grâce au bouton *ASSIGN* (*Figure 68*).

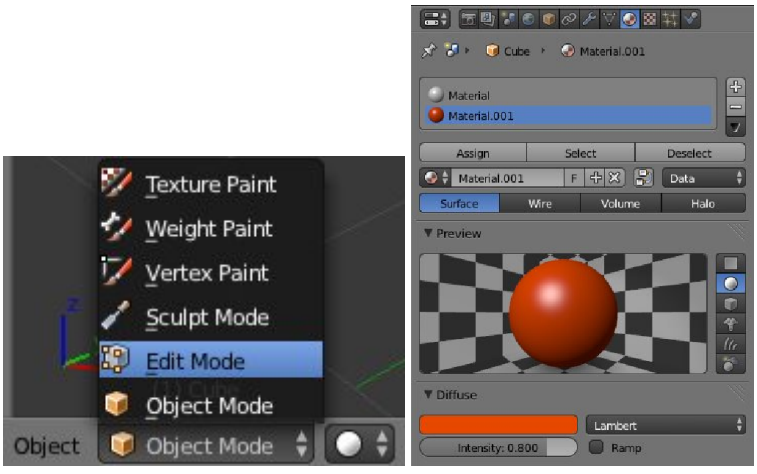

Figure 68 : À gauche : sélection du mode édition.
À droite : en mode Édition, il est possible d'assigner (bouton ASSIGN) un matériau aux surfaces sélectionnées.

Le modèle 3D apparaîtra alors coloré (*Figure 69*).

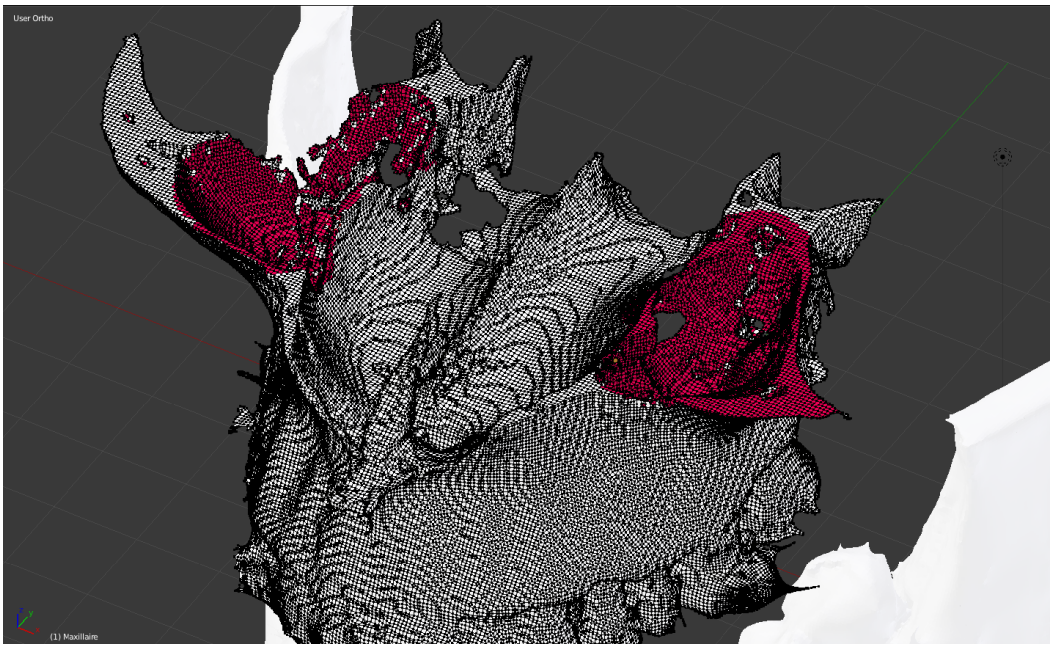

Figure 69 : Mise en évidence des parois du sinus maxillaire à l'aide de matériaux sous Blender™.

5.2.5. Exportation

Afin de créer le modèle final, nous devons regrouper les modèles précédents en un seul. Pour cela, nous pouvons opter pour une exportation en .OBJ, qui rendra le modèle lisible par Augment par exemple. Nous pouvons aussi nous aider du plugiciel d'*Augment* pour *Blender*™. Il nous suffit de sélectionner nos différents objets et d'activer l'exportation automatique (*Figure 70*).

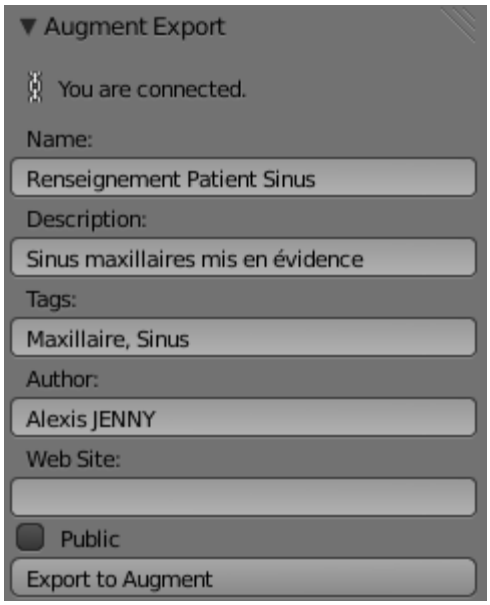

Figure 70 : Interface d'exportation automatique vers la plate-forme d'Augment.

5.3. Rendu

Une fois l'exportation terminée, nous pouvons admirer le modèle en réalité augmentée grâce aux marqueurs proposés.

Figure 71 : Affichage en réalité augmentée du modèle grâce à Augment.

Nous pouvons ensuite le replacer sur le visage du patient. Pour faciliter la manipulation, nous avons rigidifié et attaché un marqueur sur une armature de paire de lunettes (*Figure 72*). Ce tracking permet de suivre uniquement les os fixes du crâne. Nous pourrions suivre la mandibule, à condition qu'elle soit immobile par rapport à l'os maxillaire et qu'elle corresponde à la position du modèle. Les mouvements de l'os mandibulaire seront plus difficiles à suivre du fait de la complexité de l'articulation.

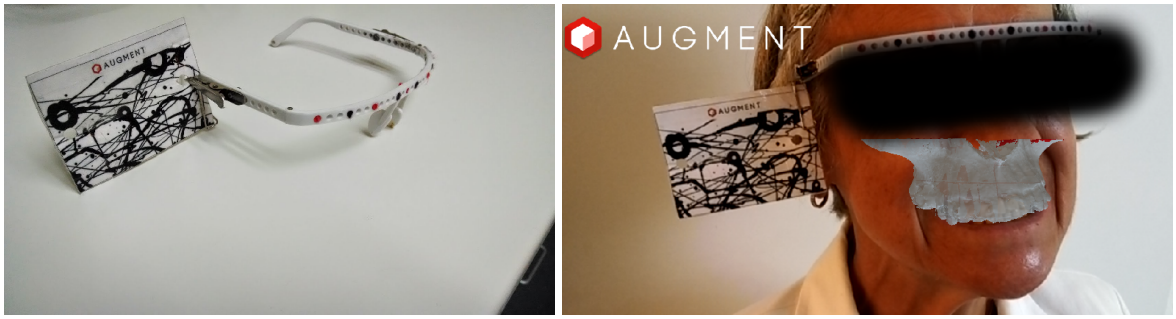

Figure 72 : À gauche: Paire de lunettes modifiée pour le marqueur rigidifié.
À droite : Calibration du modèle 3D sur le visage du sujet.

La calibration du modèle s'est faite en faisant correspondre les dents virtuelles et réelles (*Figure 72*). Nous pouvons déplacer l'os virtuel dans l'espace en le faisant glisser du doigt, en utilisant l'interface tactile, ou bien en utilisant la calibration accessible dans le menu *Paramètres* (*Figure 72*). Cette étape repose sur un processus par essai / erreur et nécessite une grande plage de temps.

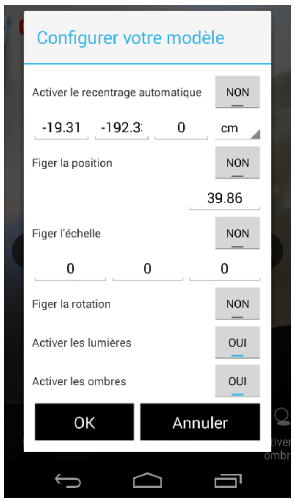

Figure 73 : Menu Paramètres d'Augment permettant un placement optimal du modèle.

Une fois le modèle bien centré, il est possible de faire bouger le sujet, ou l'observateur, et de bénéficier d'une expérience cohérente (*Figure 74)*. En fonction de la luminosité, des contrastes et de la sensibilité de la caméra, il arrive que le modèle se décale temporairement avant de se replacer. L'expérience ne bénéficie actuellement pas d'une précision suffisante pour un usage durant un acte thérapeutique.

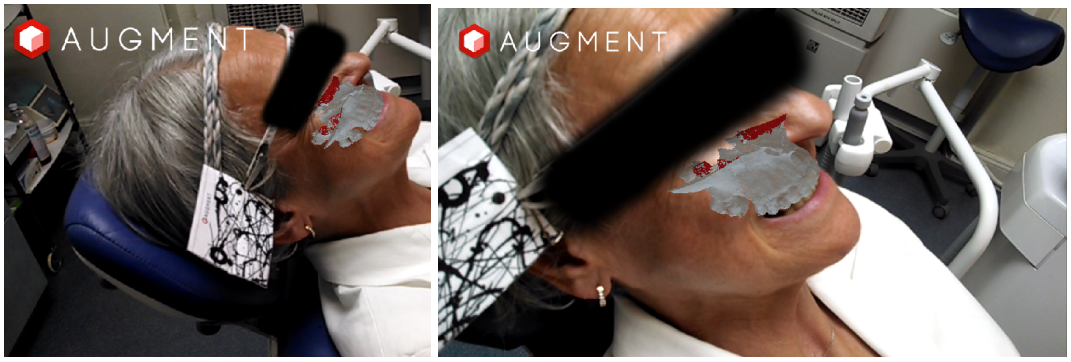

Figure 74 : Après calibration, il est possible de regarder le modèle fantôme se projeter sur le visage du patient, quel que soit l'angle de vue, à condition que le marqueur soit visible.

Le protocole détaillé ici peut également être utilisé pour réaliser des démonstrations pédagogiques. Les modèles issus d'un scanner, exploités dans les paragraphes suivants, ont tous été réalisés d'après ce protocole. Les modèles de travaux pratiques, issus d'un scanner optique sont plus simples à traiter car déjà dans un format surfacique.

6. Applications possibles de la RA en chirurgie dentaire

Les applications de réalité augmentée, dans les domaines autres que médicaux, sont très diversifiées. Elles vont de l'aide à la réparation d'un moteur au positionnement d'éléments électroniques, en passant par l'aide à la navigation. Dans notre milieu, les applications sont plus restreintes et leur intérêt dépend des performances et de la souplesse des logiciels et du matériel. Nous vous offrons un premier aperçu des applications possibles pour les chirurgiens-dentistes, débutants ou confirmés. Notez qu'à ce stade, nous approchons uniquement les intérêts. Nous avons déjà mis en avant la problématique du rendu dans les parties précédentes et nous mettrons en avant d'autres inconvénients dans les parties suivantes. Du fait de l'indisponibilité des HMD au moment de la réalisation de cette thèse, les rendus ont été ici réalisés avec un smartphone, mais il est important d'imaginer que ces concepts seront exploités à l'avenir, à l'aide de smartglasses.

Cette partie du mémoire est interactive et repose sur le logiciel *Augment,* disponible gratuitement sur *Android* et *iOS*. Reportez-vous aux Quick Response (QR) codes ci-dessous, afin d'installer l'application et de profiter pleinement de ce segment.

Application AUGMENT sur ANDROID
(Flashez le QR code pour installer)

Application AUGMENT sur iOS
(Flashez le QR code pour installer)

Lorsque vous verrez des QR codes à côté de l'icône Augment rouge (à gauche), je vous invite à les scanner avec l'application *Augment* (détaillée dans la *Figure 75*) . Les modèles présentés peuvent être superposés à un modèle frasaco utilisé à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Strasbourg.

Si vous n'avez pas de modèle d'entraînement à disposition, un deuxième QR code, accompagné de l'icône verte (à gauche), vous permettra d'afficher un modèle disposant d'une translucidité moindre, que vous pourrez apprécier pleinement.

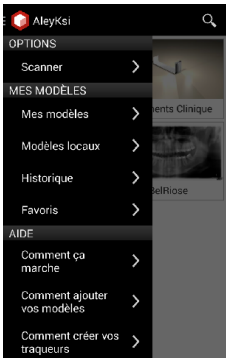

Figure 75 : Interface d'Augment sur Android. Pour scanner les QR codes, il suffit de se rendre dans le menu et appuyer sur SCANNER.

6.1. Applications pédagogiques

Les applications de la réalité augmentée citées dans cette partie, ont toutes un intérêt pédagogique. Certaines d'entre elles, peuvent tout aussi bien aider le praticien qu'il soit averti ou débutant. Dans cette première partie, nous nous intéresserons d'abord aux applications tournées vers l'utilisateur ayant peu d'expérience.

6.1.1. Travaux pratiques de prothèse fixée

La démonstration de taille de cavités (inlay, onlay…) ou de taille de moignons s'est toujours faite sur le modèle du professeur. Ce modèle est ensuite observé par les étudiants. Cette taille, parfois imparfaite quand elle est réalisée dans des conditions non optimales, servira de référence aux étudiants et il n'est possible de placer les deux modèles que côte à côte.

La possibilité de créer un modèle virtuel "parfait" et d'y adjoindre un marqueur spécifique adapté aux plaques bases, permettra de superposer un fantôme sur le modèle de l'étudiant comme un calque sur un dessin (*Figure 76*). Cela l'aidera à apprécier instantanément les défauts ou la qualité de son travail.

La principale difficulté dans ce cas est la coloration précise du modèle. En effet, le scanner optique nous a donné un modèle avec un maillage (organisation spatiale) de vertex irrégulier. Les polygones formant les limites cervicales de la taille, sont bien souvent plus larges que la taille initiale. Il est alors nécessaire de procéder à un découpage manuel très chronophage, de ces zones.

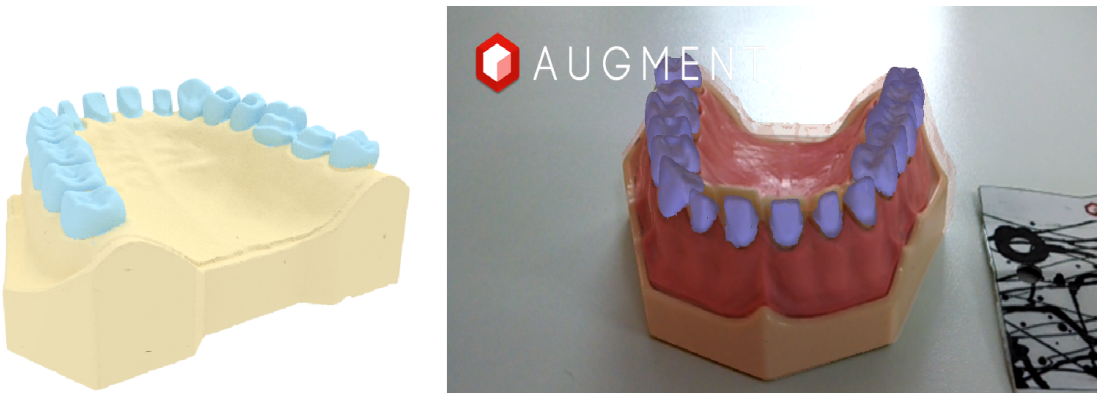

Figure 76 : À gauche : Modèle de l'enseignant pour taille d'onlay, d'inlay et bridge antérieur scanné optiquement par le laboratoire FLECHER et mis en évidence sous BLENDER™.
À droite : Modèle 3D superposé en réalité augmentée sur le frasaco physique.
Exploitable en RA via les QR Codes suivants :

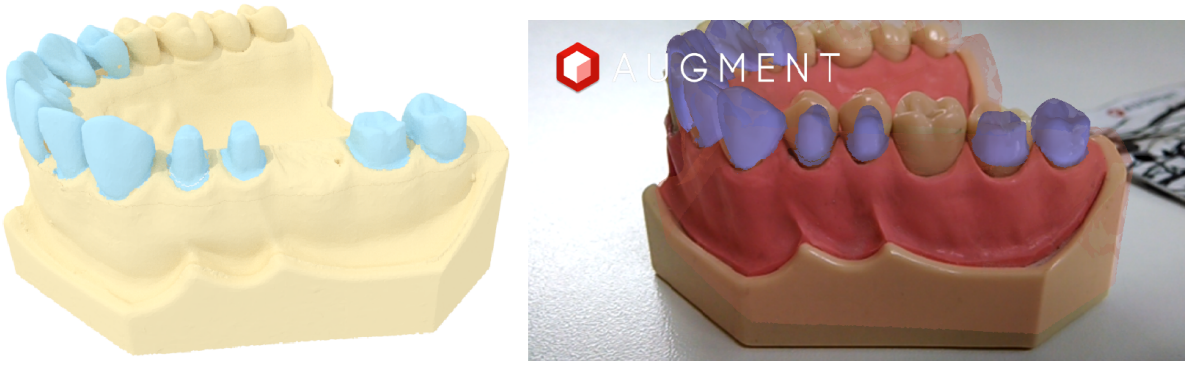

Figure 77 : À gauche : Modèle de bridge postérieur "du professeur", mis en évidence par un jeu de couleurs sous BLENDER

À droite : Modèle 3D superposé en réalité augmentée sur le Frasaco physique.

La mise en évidence des limites, via un jeu de couleurs, permet de repérer très facilement les manques ou au contraire les excès de taille.

6.1.2. Travaux pratiques d'endodontie

L'utilisation de RA durant l'apprentissage ou la réalisation des soins d'endodontie, est limitée du fait du support donné à l'étudiant : une dent véritable. En effet, l'endodonte ne peut être scanné systématiquement, ni reproduit en trois dimensions dans un logiciel de RA, du moins actuellement.

Il est cependant possible d'intégrer des animations en trois dimensions du protocole type à suivre pour un traitement. L'étudiant pourra, au choix, les consulter avant ou pendant une première pratique.

Nous pouvons par exemple imaginer des animations de protocoles pour la pose d'une digue, la cathétérisation, l'obturation ou la condensation. La seule difficulté sera de s'adapter aux contraintes du moteur d'animation du logiciel.

6.1.3. Travaux pratiques d'odontologie conservatrice

Les applications possibles de réalité augmentée en odontologie conservatrice, reprennent les principes du paragraphe 3.1.1. L'intérêt ici aussi, est de présenter la taille désirée par le professeur, en la comparant via superposition au modèle de l'étudiant.

Une autre application serait l'ajout possible d'obstacles virtuels en trois dimensions sur le modèle de l'étudiant : ajouter une carie ou une pulpe que l'étudiant devrait éviter. La réalité augmentée dans ce cas là, nous donnerait une grande latitude afin de compliquer ou de faciliter la tâche de l'apprenti.

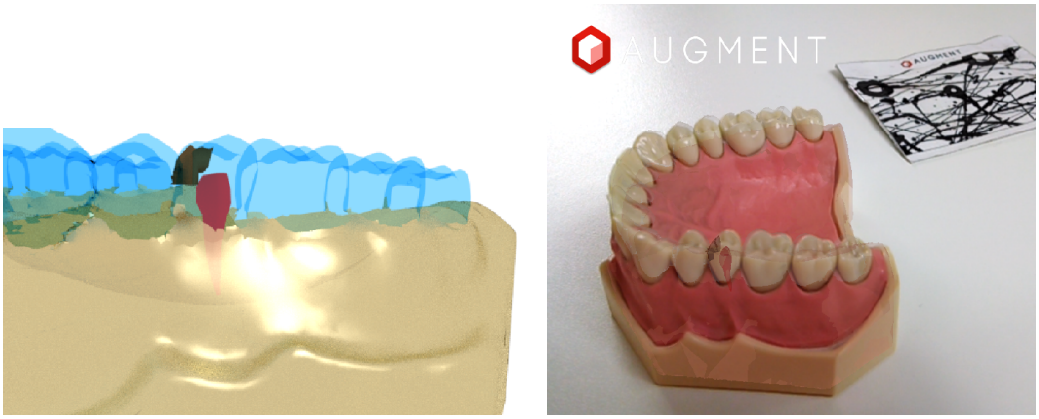

Figure 78 : À gauche : Modèle d'entraînement enrichi avec carie fictive et pulpe. Les dents auront une transparence bien plus marquée pour discerner les éléments sous-jacents : la carie (en marron) et la pulpe (en pourpre).
À droite : Modèle 3D superposé en réalité augmentée sur le Frasaco physique.

6.1.4. Cours magistraux de morphologie

L'apprentissage de la morphologie dentaire à l'université de Strasbourg se fait traditionnellement à partir de dessins, autrefois sur tableau noir et désormais sur table de projection. Ces dessins sont ensuite repris par les étudiants et utilisés comme référence pour sculpter une dent en trois dimensions durant les travaux pratiques.

Le passage d'une représentation en deux dimensions à une sculpture en trois dimensions, provoque bien souvent des confusions, si bien que nombre d'étudiants ont l'impression de redécouvrir la morphologie en travaux pratiques.

La présentation d'un modèle en trois dimensions lors de ces séances de cours magistraux, pourrait faciliter cette transition. La perspective, la possibilité d'enrichir les modèles, tout en laissant à l'utilisateur la liberté d'une exploration à sa convenance, créent une expérience ludique et motivante qui peut faciliter l'approche et l'apprentissage de la morphologie.

La réalité augmentée a l'avantage, contrairement aux représentations tridimensionnelles classiques, de pouvoir placer un modèle dans un environnement réel dont l'étudiant est familier. En effet, sur un écran, la perspective est plus difficile à cerner du fait que la caméra de rendu peut avoir une focale différente de l'oeil humain.

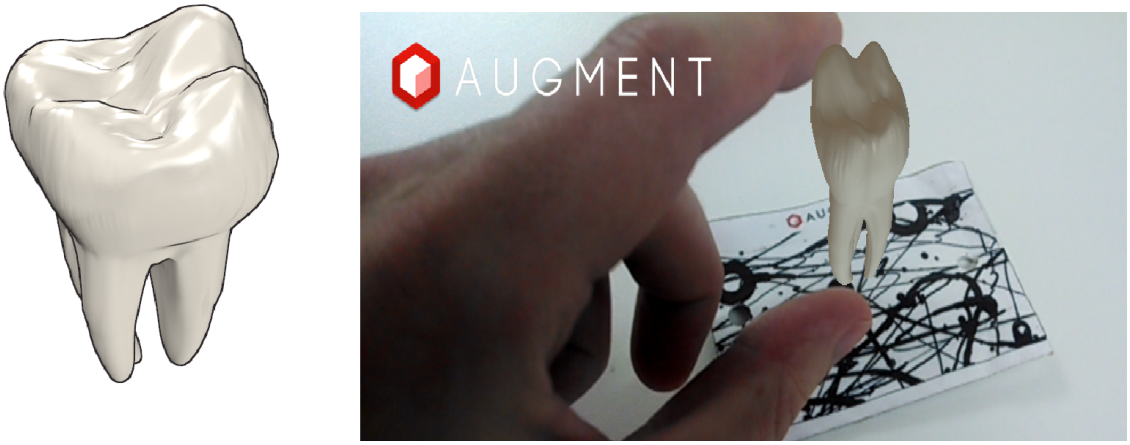

Figure 79 : À gauche : Première molaire maxillaire modélisée selon les dessins du Dr Roger JOERGER. Rendu réalisé avec Blender™ Render.
À droite : Modèle 3D en réalité augmentée.
Disponible en RA avec les codes ci-dessous

6.2. Applications cliniques

6.2.1. Utilisation en chirurgie, implantologie et consentement éclairé

L'application la plus évidente de la réalité augmentée en chirurgie dentaire, concerne l'implantologie. C'est très certainement par cette voie que la RA trouvera sa place dans notre profession.

L'utilisation d'un guide implantaire conçu par ordinateur est avantageuse lorsqu'une grande précision est requise. Par exemple à cause d'une difficulté anatomique (nerfs, sinus…) ou du fait d'un nombre important d'implants à poser et nécessitant un parallélisme entre eux. Bien qu'offrant une sécurité et un confort indéniable lorsqu'il est bien positionné, le guide implantaire n'est pas utilisé dans toutes les procédures en raison du délai de fabrication, de la difficulté de mise en place dans certains cas, du manque d'habitude du praticien ou tout simplement du fait de son coût.

La réalité augmentée pourrait prendre place dans ce domaine, sans pour autant avoir vocation à remplacer totalement le guide, dont l'avantage est d'accompagner totalement le geste du praticien et de limiter les erreurs. Il est possible d'imaginer s'afficher dans la bouche du patient, **l'emplacement des futurs implants**, ainsi que leurs axes projetés, leurs caractéristiques telles que diamètre et longueur (*Figure 80*). Il est aussi possible d'afficher le protocole de forage en fonction du système utilisé par le praticien.

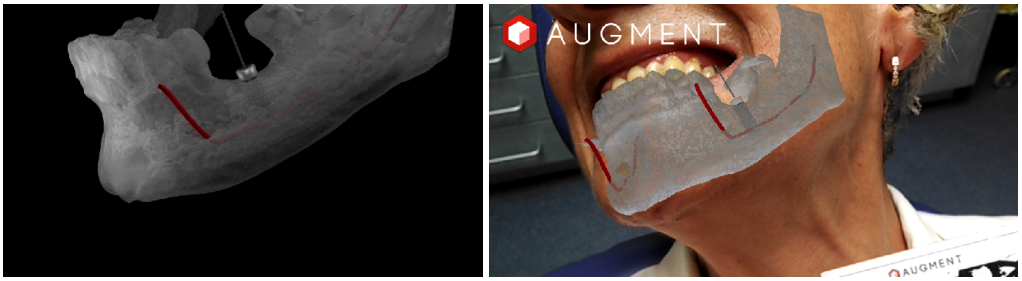

Figure 80 : A gauche : Modèle mandibulaire avec mise en évidence du trajet du V-3 et position (Fictive) d'un Futur implant.
A droite : Modèle superposé au patient en réalité augmentée.

Le domaine de la chirurgie profitera également très rapidement de la réalité augmentée, par sa facilité de mise en place pour **la recherche d'éléments pathologiques** par rapport à des repères fixes. Il est ainsi possible d'imaginer prendre une dent comme référence pour la calibration d'un modèle en réalité augmentée, puis d'afficher la position d'une lésion par rapport à cette dent.

Nous avons adjoint au cas pris comme exemple une lésion fictive (en orange sur le rendu) en regard de l'émergence du nerf mandibulaire (*Figure 81*), que nous avons ensuite projetée via Augment sur le visage du patient.

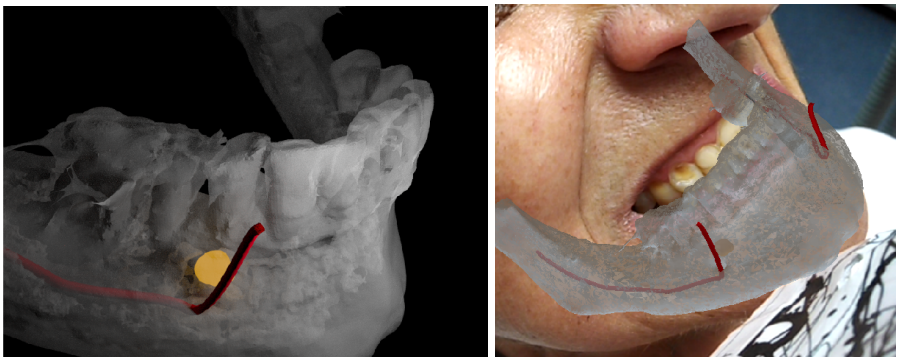

Figure 81 : Modèle avec mise en évidence du V-3 et position (fictive) d'une lésion.

La principale difficulté, actuellement, est de s'adapter aux mouvements d'un élément isolé. En effet, les examens d'imagerie proposent un modèle comprenant le système dentaire avec les os maxillaire et mandibulaire, le tout formant un bloc. Si nous souhaitons qu'un élément virtuel (par exemple une dent) se déplace sans que son support (l'os mandibulaire) ne suive, il nous faudra afficher deux modèles séparés qui suivront deux marqueurs différents.

Ainsi, jusqu'à ce que la technique rattrape cette incommodité, il est aujourd'hui difficile d'imaginer s'appuyer sur la réalité augmentée tout au long d'une procédure chirurgicale en rapport avec une structure noble, comme un nerf par exemple .

Partant de ces résultats, nous pouvons imaginer une application très facile et peu demandeuse en ressources concernant le renseignement et le consentement éclairé du patient. En effet, nos patients sont souvent peu habitués aux termes anatomiques et ne réalisent parfois pas l'étendue ou l'importance d'une lésion ou des rapports que cette dernière entretient avec des éléments anatomiques, comme les sinus ou les nerfs. La réalité augmentée permettrait, dans ces cas là, de faire **prendre conscience au patient des difficultés ou des risques qu'il encourt en cas d'intervention ou de non-intervention**.

La RA ne passerait pas obligatoirement, pour l'occasion, par des lunettes, mais pourrait passer par un marqueur suivi sur ordinateur ou sur tablette. Le patient pourrait ainsi voir se dessiner en temps réel, les éléments anatomiques, et imaginer d'autant mieux les implications ou l'étendue des risques d'une opération.

6.2.2. Utilisation en prothèse

En prothèse fixée, la réalité augmentée peut trouver une place intéressante. Du fait de la généralisation du scanner optique, il est de plus en plus facile de produire un modèle tridimensionnel sans passer par un examen irradiant.

Nous pouvons imaginer traiter une empreinte optique comme un modèle en plâtre sur lequel nous réalisons une pré-taille. Numériquement, il est alors possible de simuler l'espace minimal et/ou optimal pour réaliser une prothèse, d'en déduire **le modèle numérique "taillé" et de le replacer sur les dents du patient** afin d'obtenir notre **guide de taille** (*Figure 82*).

Figure 82 : Modèle réalisé avec l'aide de Christian KLINGER.
Guide pour des tailles parallèles de moignons.

Avec ce guide sous les yeux, il serait plus facile de visualiser l'axe de taille, de se donner une idée de l'apparence finale du travail. Il permettrait de faire la taille nécessaire à la réalisation de la prothèse.

6.2.3. Utilisation en endodontie

L'utilisation de la réalité augmentée en endodontie sera certainement plus tardive, due à la précision infra-millimétrique qui est demandée pour ce genre de soin. Nous pouvons cependant, déjà imaginer **mettre en avant la position des canaux sur un patient** à partir d'un CBCT (*Figure 83*).

Figure 83 : Concept de réalité augmentée pour l'affichage de la position des canaux endodontiques. Modèle issu d'un scanner crânien. Les canaux endodontiques ne sont pas fictifs.

6.2.4. Utilisation en radiologie

L'utilisation en radiologie serait relativement limitée et simpliste. Pour commencer, nous pourrions utiliser la réalité mixte afin d'afficher durant une intervention les examens radiologiques en deux dimensions, dans notre champ de vision, sans avoir pour autant à quitter le patient des yeux, ni créer une rupture dans le soin.

Une autre application s'inspire du système KARMA, exposé dans la première partie. Il serait possible de projeter **une image fantôme de la position idéale d'un patient** dans une machine d'examen panoramique, et d'aligner les différents plans anatomiques pour un examen optimal.

6.2.5. Utilisation durant l'anesthésie

La première anesthésie tronculaire, à l'épine de Spix, faite par un étudiant est souvent vécue comme une épreuve. Les repères varient d'un patient à un autre et, surtout, d'une morphologie à l'autre. Une fois l'aiguille insérée dans les tissus, l'étudiant n'a plus de référence, essentiellement la première fois. Il est souvent amené à se poser la question "Où est mon aiguille en ce moment ? Est-ce le moment d'injecter le reste de ma carpule ?" L'anesthésie tronculaire demande au praticien d'analyser des sensations qui ne sont acquises qu'à travers l'expérience et donc, un certain savoir-faire .

La réalité augmentée dans ce cas, pourrait permettre à l'utilisateur de **voir où se trouve son aiguille**. Il n'est pas nécessaire d'avoir un examen d'imagerie du patient, ce qui facilite la procédure.

Il suffit de calibrer la longueur de l'aiguille avec le modèle déjà en place, de l'aligner avec le marqueur (donner des valeur négatives de placement selon l'axe Z si nécessaire, comme dans l'exemple ci-dessous) et de procéder à l'insertion (*Figure 84*). La réalité augmentée apporte une vision de la position de l'aiguille quel que soit le point de vue, à condition que le repère soit toujours visible.

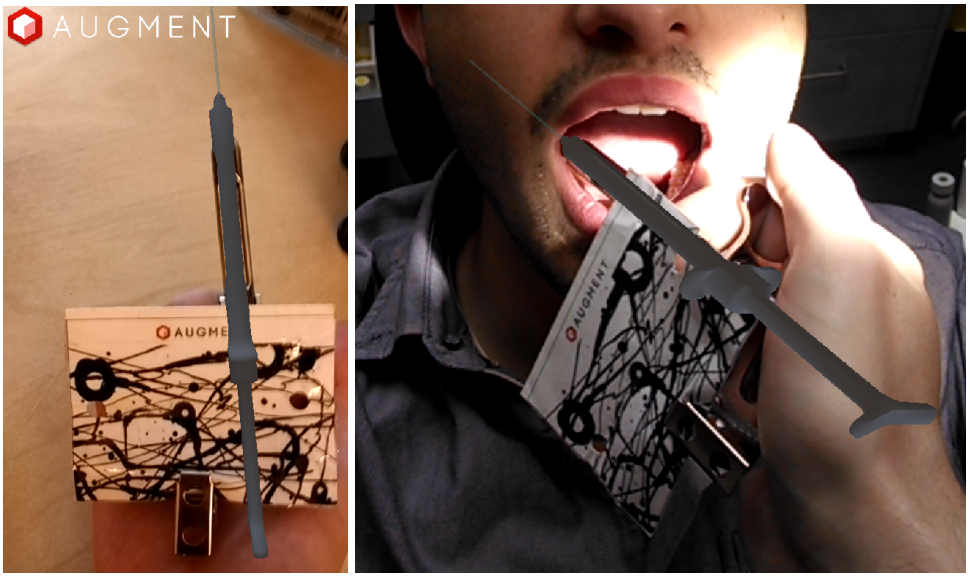

Figure 84 : À gauche: Calibration du modèle à l'aide des paramètres d'Augment.
À droite : Anesthésie augmentée permettant de localiser l'aiguille à travers la peau.

6.2.6. Utilisation en orthodontie

L'utilisation de la réalité augmentée en orthodontie s'inspirerait naturellement de l'expérience menée par l'équipe de Munich, présentée dans le paragraphe 4.6. Nous pourrions donc imaginer replacer la position des brackets d'orthodontie, ou tout autre élément, sur la surface dentaire grâce à la réalité augmentée, afin d'en **faciliter le placement sur le patient** (*Figure 85*).

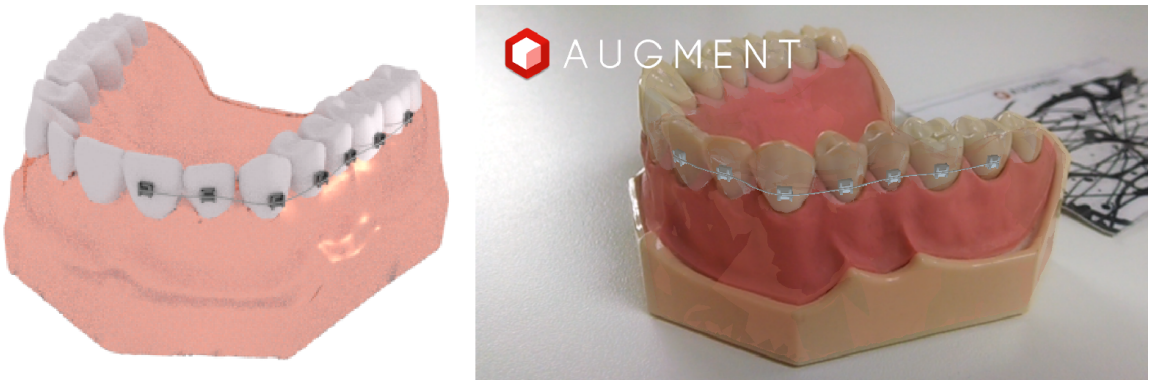

Figure 85 : À gauche : Modèle Frasaco portant des brackets d'orthodontie. Rendu avec Blender Cycles.
À droite : Superposition en réalité augmentée sur un modèle Frasaco.
Utilisable en RA avec les codes ci-dessous.

6.3. Intérêt pour le praticien

L'utilisation de smartglasses a déjà montré ses avantages en médecine via l'utilisation de réalité mixte afin de disposer d'informations pertinentes lors d'une opération.

La réalité augmentée permettrait au praticien de ne plus avoir à quitter le patient des yeux lors des soins nécessitant une précision ou un protocole rigoureux. Cela pourrait **diminuer le stress et améliorer l'ergonomie** côté praticien et ainsi **accélérer certaines tâches** qu'il ne fait pas ou peu régulièrement.

Le fait de proposer au praticien un protocole visible directement sur le patient **permettrait de s'affranchir d'une source d'erreur fondamentale : la subjectivité**.

6.4. Intérêt pour le patient

La réalité augmentée bénéficie à l'heure actuelle, de cet aspect ludique propre à chaque nouvelle technologie. Le public s'émerveille des interactions possibles entre l'homme et la machine. Si nous utilisons la RA pour expliquer, par exemple, un protocole ou une opération, l'intérêt suscité peut nous permettre de faire passer des messages convaincants. Grâce à la réalité augmentée, le patient devient le support de l'information et peut, par cette occasion, s'impliquer dans les démonstrations en explorant lui même, comme dans un miroir, ses propres structures anatomiques.

Le fait que le praticien ait toujours accès à des informations pertinentes durant le soin, peut limiter les temps de flottements anxiogènes pour le patient, quand le praticien est occupé à vérifier le bon déroulement d'une procédure.

6.5. Intérêt pour l'étudiant

L'étudiant qui réalise un geste pour la première fois, aura toujours besoin d'un guide. L'utilité d'avoir le maximum d'informations à sa disposition n'est plus à démontrer. Le fait de pouvoir superposer un protocole à un modèle réel, sera particulièrement avantageux pour la compréhension.

La réalité augmentée durant les cours magistraux, notamment de morphologie, rendra l'apprentissage bien plus efficace. D'autant plus que la plupart des étudiants disposent de nos jours, d'un smartphone capable d'un affichage en réalité augmentée.

On évitera bien évidemment de placer l'étudiant face à un cas complexe dans les premiers mois de son exercice, mais l'anxiété peut provenir d'un geste simple (comme l'anesthésie), ou par exemple de la frustration à rater un examen radiologique.

La réalité augmentée peut apporter des informations **là où les étudiants en ont le plus besoin, à savoir : sur le terrain** !

7. Discussion et avenir de la technologie

7.1. Critique du protocole utilisé

Le protocole détaillé dans cette thèse présente plusieurs défauts. Nombre de ceux-ci sont dûs aux logiciels utilisés et au fait que cette technologie est encore en développement à ce jour. D'autres défauts proviennent du matériel. **En effet, pour des raisons évidentes de coût, nous nous sommes limités aux méthodes accessibles au grand public**. Nous pouvons cependant proposer quelques solutions à ces problèmes.

Défaut : La conversion d'un modèle volumique, issu du scanner, en surfacique a nécessité de nombreuses approximations. La complexité d'un fichier *DICOM* nous obligeait à réduire la résolution lors de la segmentation. La conversion et le rendu d'un modèle ont été réalisés en passant par un calcul effectué par le CPU, ce qui a mené à de nombreuses interruptions abruptes du logiciel et des fuites de mémoire rendant le système instable. L'impossibilité de passer par un rendu GPU nous a obligé à faire des concessions, dès l'ouverture de l'examen médical, en limitant la résolution.
Solution : L'idéal, mais apparemment difficilement réalisable, serait de disposer d'un rendu direct de l'examen d'imagerie en réalité augmentée, sans passer par une conversion préalable. La solution temporaire en attendant que le matériel le permette, serait de permettre une conversion et une optimisation en une étape, passant par un GPU. Le logiciel *Accuguide*® permet une segmentation utilisant le GPU et propose à l'utilisateur d'exporter les modèles en fichiers .STL standards.

Défaut : Un scanner découpant les volumes en voxels, induit une reconstruction moins précise aux interfaces entre les tissus de densité différente, notamment en basse résolution. La surfaces dentaires sont, par conséquence, sur- ou sous-évaluées, sans parler des artéfacts liés aux métaux, ce qui peut gêner la calibration en fonction du contours des dents.
Solution : Réaliser une empreinte dentaire plus précise, la scanner optiquement et la fusionner avec le modèle tridimensionnel issu du scanner. Le logiciel *AccuGuide*® permet de panacher les examens d'imagerie 3D avec un modèle issu d'un scan optique et de supprimer les surfaces redondantes qui pourraient alourdir le modèle surfacique.

Défaut : Le marqueur n'est pas solidarisé aux dents du patient mais au crâne, ce qui empêche de tracker les mouvements de la mandibule par exemple. De même, la position du marqueur éloignée de la zone d'intérêt, empêche les gros plans.
Solution : S'inspirer du système *Robodent* par exemple, en intégrant un marqueur dans une gouttière. Une autre solution serait de proposer, comme l'a fait l'équipe de Munich citée dans le paragraphe 4.6, un repérage des contours et caractéristiques afin de superposer le modèle en temps réel.

Défaut : Les couleurs, transparences et contrastes ne sont pas réglés de façon optimale.
Solution : Pour les rendus, nous avons opté pour une transparence entre 20% et 60% (ou opacité de 40% à 80%), ce qui semblait être le meilleur compromis pour l'élaboration des concepts. Il serait intéressant de réaliser une étude sur degrés d'opacité idéaux et les jeux de couleurs utilisables en situation de soin, afin de contraster au mieux avec les surfaces anatomiques.

Défaut : L'utilisation d'un smartphone ou d'une tablette pour les rendus ne permettent pas d'évaluer la difficulté d'utilisation en situation réelle avec un HMD.
Solution : Évidente, utiliser un HMD.

Défaut : Nous avons utilisé un logiciel de RA non étudié pour les cas cités.
Solution : Développer un logiciel répondant aux problèmes cités ci-dessus.

Augment, bien que très performant, est plus adapté aux étudiants travaillant en salle de fantôme, là où les contraintes sont moindres, les conditions optimales et les modèles simples. Il est important de noter que tout au long de cette thèse, j'ai reçu un très grand soutien des développeurs. Ceux-ci ont grandement amélioré leur logiciel et il ne serait pas absurde de surveiller l'évolution de cette application, afin de vérifier si elle devient compatible avec de plus grandes ambitions.

7.2. Problématique des HMD et ses possibles solutions

Outre les problèmes de rendu soulevés dans la partie 3.3, l'introduction de la réalité augmentée sera ralentie par l'inadaptation des HMD aux milieux de soins, notamment au niveau de l'ergonomie et de l'interface homme/machine. Ces terminaux ne pourront s'inviter en salle de soins qu'à partir du moment où les interactions seront devenues plus aisées. Nous analyserons succinctement les avantages et inconvénients de chacune des interfaces homme/machine actuellement explorées et détailleront d'autres problèmes inhérents.

7.2.1. Interface praticien/matériel

Un rendu et une précision parfaits ne suffiront pas à rendre agréable l'utilisation de réalité augmentée lors des soins. Il sera nécessaire de rendre l'interaction homme/machine aussi naturelle et souple que possible. Il existe plusieurs interfaces exploitables : la voix, les gestes et les périphériques (souris, clavier, zone tactile…)

7.2.1.1. Commandes vocales

La tendance actuelle est à la commande vocale depuis l'introduction vers le grand public, de *SIRI*™ par *Apple*® en tant qu'assistant personnel en 2011, rapidement suivi par *Samsung*® avec *S-Voice*™. Des alternatives open source ont rapidement été développées et publiées. Ces assistants personnels permettent de reconnaître et d'interpréter des commandes orales de l'utilisateur. Les commandes vocales sont très utilisées et mises en avant par les constructeurs, comme étant un des moyens les plus naturels de communiquer avec l'appareil. Les lunettes de Google, les Google Glass, sont toujours à l'écoute de la commande "*Ok Glass*". Dès lors que la commande est entendue, les Glass affichent une série de commandes possibles (*Figure 86*) que l'utilisateur peut dicter à voix haute. Il n'est pas nécessaire d'interagir tactilement avec les lunettes même si cela est possible.

Cette interface comporte tout de même certains désavantages dans notre profession :

- il y a rupture du dialogue avec le patient pour s'adresser à la machine, ce qui peut entraîner certaines confusions ;
- la reconnaissance vocale peut être calibrée pour reconnaître seulement certaines voix, mais deux timbres de voix similaires peuvent tout de même déclencher les mécanismes de reconnaissance automatique ;
- l'utilisation d'appareils rotatifs dans notre profession, peut rendre la reconnaissance difficile durant un soin ;
- la reconnaissance de certains termes médicaux est encore hasardeuse.

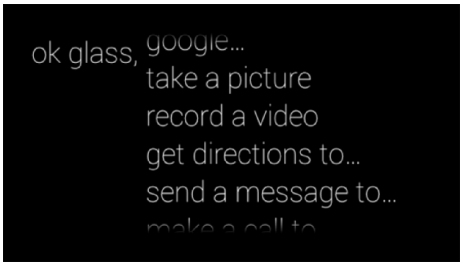

Figure 86 : Liste des commandes des Google Glass en 2014

7.2.1.2. Commandes visuelles et gestuelles

Les commandes visuelles correspondent à des mouvements réalisés par l'utilisateur. Elles sont également exploitées dans les concepts de lunettes de réalité augmentée.

Les mouvements peuvent être interprétés dès l'instant où la main de l'utilisateur est reconnue par une caméra. Le kit de développement On-The-Go pour Google Glass permet de reconnaître plusieurs gestes comme le balayage de la main ou le poing serré. Ces gestes pourraient être liés à plusieurs actions telles que :

- Augmenter ou baisser la transparence d'un modèle
- Passer d'une information à l'autre
- Lancer la reconnaissance de visage d'un patient

Cependant la reconnaissance des gestes pose les problèmes suivants :

- le logiciel reconnaît toutes les mains présentes à l'écran, aussi bien celles du praticien que celles de l'assistante ou du patient ;
- le logiciel pourrait reconnaître des gestes alors que le praticien n'a pas invoqué clairement le logiciel ;
- la réalisation des gestes peut demander l'arrêt de la réalisation du soin en cours et par conséquent d'avoir à poser les instruments ou les rotatifs en cours d'utilisation.

Cette technologie est amenée à évoluer pour permettre à une intelligence artificielle de différencier les mouvements qui s'adressent à l'appareil des autres mouvements.. A l'heure actuelle, il n'existe pas de technique de reconnaissance visuelle suffisamment fiable pour autoriser une utilisation sans erreur.

Certaines smartglasses peuvent utiliser le gyroscope et l'accéléromètre pour traduire des commandes données par l'utilisateur. Rappelons que ces capteurs peuvent mesurer l'inclinaison et l'accélération de l'utilisateur. L'application "VitalStream" de VitalMedicals[35], sur Google Glass™, permet par exemple au médecin d'afficher les signes vitaux d'un patient. Pour naviguer dans l'application le médecin doit:

- Appeler l'application avec la commande vocale : "*Ok Glass, Show me vitals*"
- Tourner la tête légèrement à droite ou à gauche pour naviguer vers un menu
- Acquiescer pour sélectionner ce menu

La reconnaissance gestuelle est alors désactivée et le médecin peut travailler sans se soucier des faux-positifs. S'il veut réactiver la commande gestuelle, il devra alors incliner la tête durant trois secondes pour reprendre la navigation dans les menus.

	Démonstration du VitalStream https://www.youtube.com/watch?v=f2ZtM9JF1OE

L'utilisation des commandes gestuelles dans ce cas là est élégante, car elle demande au praticien d'appeler explicitement l'application informatique. Cependant, le fait d'incliner la tête durant trois secondes peut toujours déclencher des faux positifs dans certains cas.

[35] *Vidéo sur la chaine Chaine de VitalMedicals*
Lien : https://www.youtube.com/channel/UCfK4PPVUMjGzH4njvk_SqNw/feed

Il est possible d'utiliser un appareil portatif de reconnaissance de mouvements du bras. Un de ces dispositifs, *Myo* (*Figure 87*), est développé par ThalmicLabs®, une entreprise canadienne. Il se présente comme un brassard disposant d'électromyogrammes pouvant analyser les mouvements réalisés par l'utilisateur.

Figure 87 : A gauche: Brassard Myo de ThalmicLabs®
A droite : Image expliquant le fonctionnement du brassard Myo, tirée de la vidéo promotionnelle.

	Vidéo promotionnelle du Myo de ThalmicLabs® https://www.youtube.com/watch?v=oWu9TFJjHaM

7.2.1.3. Commandes tactiles

Figure 88 : Zone tactile des Google Glass

L'avantage indéniable des zones tactiles des smartglasses (*Figure 88*) réside dans le fait que l'utilisateur contrôle intégralement l'appareil. Il y a très peu de faux positifs, les gestes sont simples et immédiatement reconnus : glissement vers l'avant, le bas, l'arrière ou le haut, le clic, le double-clic, le clic prolongé.

Cet avantage de proposer une liaison directe entre le matériel et l'utilisateur, est malgré tout un inconvénient au niveau de l'hygiène. Même si nous pouvons les considérer comme un dispositif médical non critique en l'état, le fait de les toucher avec des gants souillés les rend semi-critiques. Ces lunettes ne peuvent pas être stérilisées et sont sensibles aux agents désinfectants, ce qui en font un **maillon faible de l'hygiène**.

7.2.2. Données médicales confidentielles

Les articles publiés rapportant l'utilisation des *Google Glass* soulèvent un problème particulier avec cet appareil, non encore résolu. Les lunettes de Google font transiter les données sur le serveur du géant californien. Or, le secret médical n'autorise pas qu'un tiers, dans ce cas une société non spécialisée en santé, ait accès à ces données.

Il en est de même pour le protocole utilisé ici. En effet, certains modèles issus de scanner, sont stockés sur les serveurs d'*Augment*. Bien que ces modèles soient totalement anonymes, ils constituent tout de même des données personnelles qu'il serait plus sûr d'héberger sur des machines couvertes par le secret médical.

Si un matériel de réalité augmentée doit nécessairement récupérer des données personnelles, il nous faut nous assurer qu'**elles le soient dans le respect de la vie privée**.

7.2.3. Avenir du matériel

Suite aux réflexions concernant les points techniques à améliorer, nous pouvons constater que la paire de lunettes de réalité augmentée est encore à perfectionner. Nous n'en sommes qu'à la première génération de ce matériel, et nous ne pouvons qu'être optimistes quant aux progrès à venir. La plupart des HMD actuels se basent sur des architectures proches des smartphones. L'évolution du matériel étant très rapide, leur miniaturisation et leurs capacités vont en s'accroissant. S'ils ne sont pas encore adaptés à une utilisation au fauteuil, ceci pourrait n'être qu'une question de temps !

La paire de lunettes idéale devrait disposer :

- d'un affichage stéréoscopique afin de faciliter la perception de la position de l'objet virtuel dans l'espace. La calibration de la DIP devrait être possible afin de donner un rendu correct de la profondeur ;
- d'un écran suffisamment transparent de façon à ne pas gêner la visibilité ;
- d'une luminance convenable de façon à pourvoir afficher un modèle en cas de forte luminosité/contraste ;
- de commandes vocales accessibles via un mot clé afin d'éviter les commandes non souhaitées.

7.3. Projet de logiciel

Les applications possibles de RA dans notre profession, sont nombreuses et d'autres applications dans le domaine de la santé verront le jour dans les années à venir. Actuellement cependant, il est pertinent d'utiliser la RA uniquement dans les domaines pédagogiques car la précision et les contraintes d'utilisation n'autorisent pas une utilisation au fauteuil. Il serait donc intéressant de développer un ou plusieurs logiciels reposant sur les concepts énumérés dans ce rapport répondant à un cahier des charges adapté à l'utilisation en milieu de soins.

Le logiciel à développer se devrait de proposer un accès **à une base de données locale**, afin de garantir la sécurité des données du patient. Il devrait être compatible avec u**n ensemble de marqueurs**, permettre une **reconnaissance des formes** pour la calibration du modèle, et autoriser la **manipulation de différents paramètres** comme la luminosité, le contraste, la transparence...

Pour la réalisation de cette tâche, nous pourrions nous aider de librairies de fonctions comme par exemple, l'*ARToolkit*[36]. Très souvent citée, cette librairie, dans laquelle un développeur peut piocher des fonctions afin de construire une application, est gratuite pour un usage non commercial.

Parmi ses avantages, nous pouvons citer:

- Accès à une librairie multiplateforme : Windows™, Linux, Mac OS X™...
- Possibilité de rajouter des objets virtuels en 3D sur des marqueurs via un algorithme de détection
- Le support de
    - multiple sources : USB, firewire, carte d'acquisition
    - multiple formats : RGB, YUV
    - tracking de multiples caméras
- Accès à une interface graphique
- Une reconnaissance rapide et légère d'un marqueur planaire
- Calibration aisée
- Rendu rapide en OpenGL
- API simple et modulaire en C
- Autre langage supporté: JAVA et Matlab
- Open Source avec une licence GPL pour un usage non commercial

Ce framework a été porté sur la plateforme mobile Android et iOS par ARToolWorks inc, sous les mêmes termes de licence.

D'autres librairies sont disponibles, telles que Wikitude, Métaio, ARMedia… supportant diverses fonctionnalités et rendant abordable la programmation d'applications de RA. Un tableau comparant les fonctionnalités de ces kits de développement est disponible à cette adresse :

	Tableau comparatif des frameworks pour applications de RA http://socialcompare.com/fr/comparison/augmented-reality-sdks

[36] *Site internet officiel de l'ARToolKit*
Lien : http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/

8. Conclusions

Que ce soit dans les médias, dans le domaine du divertissement, ou même dans le domaine médical, une place de plus en plus importante est accordée à la réalité augmentée. Ce terme, à la fois troublant, séduisant et essentiellement vendeur, suscite tout d'abord la curiosité, puis l'intérêt. Le réel et le virtuel sont des sujets complexes menant à de nombreuses confusions, aussi en avons-nous simplifié l'approche : la réalité se compose du réel actuel et du virtuel. Nous pouvons mélanger ces deux repères dans notre perception du monde. Ceci nous amène à la réalité hybride, à l'intérieur de laquelle la réalité augmentée trouve sa place et son rôle : celui d'afficher le virtuel en surimpression afin de fournir des informations supplémentaires.

La conceptualisation de la réalité augmentée remonte à plus de 100 ans. Ce n'est qu'au début des années 1990 que la technologie a pu rattraper l'imagination des auteurs de science-fiction du siècle précédent. Depuis, les applications se multiplient, les technologies avancent, à tel point que les communautés de développeurs commencent à s'entendre sur la mise au point d'un standard.

Pour augmenter notre vision de la réalité, il est premièrement nécessaire de savoir ce que nous voyons et comment l'élément à augmenter se meut dans le champ de vision. Nous avons plusieurs méthodes pour déterminer la position d'un utilisateur : marqueur visuel, reconnaissance de contours et caractéristiques, capture de mouvement, ou alors des méthodes plus globales : par réseaux sans fil, par satellites… Ces techniques sont plus ou moins adaptées à certaines utilisations de réalité augmentée. Dans notre cas, la reconnaissances des contours et des caractéristiques semble être la méthode la plus appropriée.

Vient ensuite la question du support. Nous pouvons utiliser un ordinateur, un terminal mobile ou un Head-Mounted Display (HMD ou visiocasque en français), appareil destiné à être porté sur la tête de l'utilisateur tels que les *Google Glass*, les *Laster See-thru* ou *l'ORA-1 d'Optinvent*.

Un HMD permet à l'utilisateur de garder les mains libres. Mais n'étant qu'à la première génération de ces matériels, l'ergonomie et les performances ne sont pas encore au rendez-vous, de plus, leur disponibilité est limitée. La réalité augmentée prendra son essor auprès du grand public et des professionnels lorsque ce type de matériel sera plus répandu sur le marché. Ces HMD peuvent s'avérer très utiles pour les praticiens, sans pour autant avoir recours à la réalité augmentée. Leur capacité à présenter des informations en réalité mixte et les possibilités de téléprésence rendent déjà leur utilisation séduisante. Aux portes d'une commercialisation à grande échelle, ils ne sont pas tous destinés à réaliser de la vraie réalité augmentée. Leur utilisation, du moins au début, s'orientera vers de la réalité mixte, de type Affichage Tête Haute (ATH). La première génération soulèvera son lot de problèmes que nous avons évoqués : vision uniloculaire, ou si binoculaire, la calibration de la distance interpupillaire ne sera pas forcément proposée d'emblée. La transparence et la luminance de l'écran nous imposeront de faire un choix entre un bon contraste ou une bonne visibilité. Le fait que ces équipements ne soient pas stérilisables ou désinfectables totalement, ralentira leur introduction dans les salles de soins.

Un autre support exploitable est le terminal mobile : smartphone ou tablette. Ces terminaux sont à mi-chemin entre les ordinateurs, de par leur performance et disponibilité, et les HMD, de par leur mobilité et leur architecture. Ces terminaux sont donc un bon moyen de se donner une idée des performances qu'offriront les HMD dans quelques années.

Le rendu en réalité augmentée engendre quelques problèmes : certains sont intrinsèques au support, d'autres sont généraux à la réalité augmentée. La nature même de la réalité augmentée à se superposer à notre perception du monde, implique une perte de cohérence spatiale lors du passage d'éléments entre l'utilisateur et l'objet augmenté. Les temps nécessaires au calcul du rendu, décalant l'affichage, peuvent provoquer des nausées. L'éclairage des scialytiques entravera le fonctionnement des matériels en raison des forts contrastes créés : les caméras auront des difficultés à fixer le sujet parfois sur ou sous-exposé, devant passer d'une forte à une faible luminosité ou vice-versa. L'affichage pourra ne pas forcément se distinguer par rapport à ce fond. Nous n'en sommes qu'aux balbutiements de la réalité augmentée, mais compte tenu des pas de géants que font les constructeurs, nous ne pouvons

qu'être optimistes quant à la résolution de ces problèmes dans les années à venir.

La réalité augmentée n'a pas attendu l'avènement des HMD pour commencer à se développer dans le milieu médical. Depuis les premiers prototypes au milieu des années 1990, dont celui de Bernard PEUCHOT, la technique s'est développée en même temps que le spectre d'activités qui peuvent être accompagnées par la réalité augmentée. Ainsi l'IRCAD, à Strasbourg, a publié des informations sur une opération de résection du foie, où la RA est fortement mise en avant. D'autres expériences ont, par exemple, utilisé la RA pour combattre les douleurs liées aux membres fantômes ou pour placer des brackets d'orthodontie chez un jeune patient. Il n'existe pas encore de logiciels de réalité augmentée médicale totalement aboutis. Les expérimentations actuelles en trois dimensions,ne sont pas toutes parfaites. Bien souvent, quand le résultat est flatteur, le placement est manuel ; quand le placement est automatique, le rendu est gênant ; quand le rendu est correct et automatique, la précision ou les performances chutent, ou encore, le système n'est pas adapté à notre exercice.

Après avoir pris connaissance de différentes expérimentations réalisées par diverses équipes, nous avons réalisé notre expérience. Notre objectif était, en partant d'un examen d'imagerie médicale, de superposer sur le visage d'un patient un modèle tridimensionnel. Nous avons donc converti puis nettoyé le modèle avec Blender™ et mis en évidence les structures pertinentes. Grâce à Augment, et à l'aide d'une paire de lunettes modifiée, nous avons réussi à projeter nos modèles en trois dimensions. Cette méthode, bien qu'insuffisamment précise pour une utilisation au fauteuil, nous a tout de même permis de nous faire une idée des performances, de l'aide, mais aussi des problèmes engendrés par la réalité augmentée.

L'objectif de cette thèse était de présenter quelques concepts d'applications pratiques pertinentes de la réalité augmentée en chirurgie dentaire. Nous en avons exposé un certain nombre, dont l'intérêt se situe tant au niveau pédagogique (cours magistraux, travaux pratiques, consentement éclairé du patient…), que clinique (chirurgie, implantologie…). **Ces concepts devront encore être testés auprès des étudiants et des professionnels afin de valider leurs apports**. Ce travail n'est donc pas une fin en soi, mais une **introduction vers d'autres travaux**.

La somme des connaissances acquises durant ce travail, nous donne à penser que la réalité augmentée s'invitera à moyen terme dans notre profession. **La réalité augmentée est une avancée technologique qui va à la fois dans le sens du praticien et du patient**. Stress amoindri, aide permanente sans pour autant diminuer la part de réflexion ni de mérite du praticien, informations supplémentaires, informations croisées : les avantages ne manquent pas. Croiser plusieurs examens dans un seul modèle ou une suite de modèles, renforcera d'autant plus l'intérêt de la réalité augmentée.

Projetons-nous dans quelques années, imaginons un rendu et une calibration parfaits : nous serons alors demandeurs d'une avancée supplémentaire : **l'interaction entre le réel et le virtuel**. La réalité augmentée évoluera dès lors vers un autre domaine : celui de la **virtualité augmentée**.

Pour comprendre ce que l'utilisateur souhaite voir, ce qu'il est **pertinent de voir**, le simple suivi de marqueurs ou de formes ne suffira plus. L'utilisateur aura recours à une intelligence artificielle (IA) qui pourra déterminer la nature du sujet observé, analyser ce que nous voyons et déterminer les informations que nous en attendons. Cela nécessite une infrastructure informatique suffisante pour permettre à un algorithme de traiter des quantités astronomiques de données. Ces infrastructures sont actuellement détenues par les géants de l'informatique, qui ont alors accès aux données personnelles et médicales.

Il ne revient qu'à nous de contribuer à la mise au point de notre propre système de réalité hybride, en fixant nos propres objectifs et règles, afin que demain, la **réalité augmentée soit véritablement au service des professionnels de santé et des patients, dans le respect de la vie privée**.

Bibliographie et Sources

1. *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum / Paul MILGRAM, Haruo TAKEMURA, , Akira UTSUMI et Fumio KISHINO - [1994]*

2. *Mediated Reality with implementations for everyday life / Steve MANN - MIT Press Journal [2006]*
   Lien : http://wearcam.org/presence-connect/ par Steve MANN

3. *The Master Key / Lyman Frank BAUM [1901]*

4. *Brevet du Sensorama déposé par Morton HEILIG [1956]*
   Lien : http://www.mortonheilig.com/SensoramaPatent.pdf

5. *Augmented Reality in Education and Training / Kangdon LEE*
   TechTrends 56, no. 2 [2012] : 13-21. doi:10.1007/s11528-012-0559-3.

6. *Site web de Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance*
   Lien : http://monet.cs.columbia.edu/projects/karma/karma.html

7. *A Proposal for AR Browser Interoperability / AR Browser Interoperability Engineering group*
   Lien :
   http://www.perey.com/ARStandards/AR_Browser_Interoperability_Architecture_Jan_21_2014_v1_2.pdf

8. *Handy AR: Markerless Inspection of Augmented Reality Objects Using Fingertip Tracking / Taehee Lee, Tobias Höllerer*
   Lien : http://ilab.cs.ucsb.edu/projects/taehee/HandyAR/

9. *Robust Feature-based Object Tracking / Bing HAN, William ROBERTS, Dapeng WU et Jian LI*

10. *Chirurgie implantaire sans lambeau, intérêts de la robotique passive système Robodent® / ARMAND, LEGAC, MIR et ALLARDI*
    Réalités Cliniques vol. 20 n°4 [2009]

11. *3D TRACKING BASED ON INFRARED CAMERAS / Olivier MAGNEAU, Patrick BOURDOT, Rachid GHERBI*
    Lien : http://archives.limsi.fr/Individu/magneau/publi/iccvg2002_magneau.pdf

12. *Indoor RFID Tracking / RFID Center*
    Lien : http://www.rfidc.com/docs/indoor_rfid_tracking.htm

13. *RFID Solutions for Healthcare Industry / RFID for Healthcare*
    Lien : http://healthcare.gaorfid.com/

14. *Exploring Equiveillance / Ian KERR*
    Lien : http://www.anonequity.org/weblog/archives/2006/01/exploring_equiv_1.php

15. *Site internet de l'eyetap*
    Lien : http://www.eyetap.org/research/eyetap.html

16. *Présentation de la société LASTER*
    Lien : http://laster.fr/laster/societe/

17. *Site internet des MetaSpace Glasses*
    Lien : https://www.spaceGlasses.com/

18. *Brevet du TelesphereMask déposé par Morton HEILIG*
    Lien : http://www.mortonheilig.com/TelesphereMask.pdf

19. *1988 Anthropometric survey of US army personnel : correlation coefficients and regression equations*
Lien : http://www.humanics-es.com/ADA224986.pdf

20. *Site officiel de l'IRCAD*
Lien : http://www.ircad.fr/recherche/rd/VR-Planning/

21. *Camera virtual equivalent model, 0.01 pixel detectors, Special issue devoted to 3D Advanced image processing in medicine / Peuchot B. - Computerized medical imaging and graphics, vol. 17, n°4/5, pp. 289-294, [1993]*

Réalité virtuelle, application à la chirurgie des scolioses / Peuchot B., Tanguy A., Eude M. - CVRMed'95 First International Conference on Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine, Nice, [1995]
Lien : http://www.cnrs.fr/Cnrspresse/n15ba3.html ;

22. *Vidéo "La Réalité Augmentée" [2006]*
Lien : http://www.canal-u.tv/video/science_en_cours/la_realite_augmentee_1996.150

23. *Chicago Surgeon to Use Google Glass in Operating Room / BJ Lutz et Nesita Kwan - [2013]*
Lien : http://www.nbcchicago.com/news/tech/Google-Glass-surgery-237305531.html

24. *Page internet "Imagine seeing a surgery live through the eyes of the surgeon…" / Ohio State University - [2013]*
Lien : http://medicalcenter.osu.edu/mediaroom/features/Pages/Google-Glass.aspx

25. *Google Glass: Surgeons' new best friend / Time of India [2013]*
Lien : http://timesofindia.indiatimes.com/c/c/c/c/articleshow/28001598.cms

26. *Google Glass Delivers New Insight During Surgery / Leland KIM [2013]*
Lien :
http://www.ucsf.edu/news/2013/10/109526/surgeon-improves-safety-efficiency-operating-room-Google-Glass

27. *Portfolio d'applications du groupe DROIDERS*
Lien : http://www.droiders.com/portfolio/

28. *Special glasses help surgeons 'see' cancer - Washington University in Saint-Louis*
Lien : https://news.wustl.edu/news/Pages/26496.aspx

29. *Treatment of phantom limb pain (PLP) based on augmented reality and gaming controlled by myoelectric pattern recognition: a case study of a chronic PLP patient / Max ORTIZ-CATALAN, Nichlas SANDER, Morten B. KRISTOFFERSEN, Bo HAKANSSON et Rickard BRANEMARK [2014]*

30. *Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors / V. RAMACHANDRA et D. ROGERS-RAMACHANDRA (1996). "". Proc. Biol. Sci. 263, 377–386.*
doi: 10.1098/rspb.1996.0058

31. *Target achievement control test: evaluating real-time myoelectric pattern-recognition control of multifunctional upper-limb prostheses / A.M. SIMON., L.J. HARGROVE, B.A. LOCK et T. KUIKEN. [2011].*
J. Rehabil. Res. Dev. 48, 619–628. doi: 10.1682/JRRD.2010.08.0149

32. *Image-Based Tracking of the Teeth for Orthodontic Augmented Reality / André AICHERT, Wolfgang WEIN, Alexander LADIKOS, Tobias REICHL et Nassir NAVAB - [2012]*

33. *Chiffres-clés : les OS pour smartphones - Zdnet*
Lien : http://www.zdnet.fr/actualites/chiffres-cles-les-os-pour-smartphones-39790245.htm

34. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie / J.P Dillenseger, E. Moerschel.*
Edition MASSON, Page 132

35. *Vidéo sur la chaine chaine de VitalMedicals*
Lien : https://www.youtube.com/channel/UCfK4PPVUMjGzH4njvk_SqNw/feed

36. *Site internet officiel de l'ARToolKit*
Lien : http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/

Mentions légales

Les images, marques et logiciels cités dans cette thèse et rassemblés dans la liste ci-dessous, appartiennent à leurs propriétaires respectifs.

- Accuguide®
- Apple®: iPhone™, iPad™, iPod™ , MacOS™, Siri™
- ARToolKit
- Augment®
- Boeing®
- Epson®
- Eye-Tap
- Frasaco®
- Garmin® : Garmin HUD
- Ikea®
- Laster® : See-thru
- Lego®
- LAYAR®
- Microsoft® : Kinect™, Windows™
- Google® : Android™, Nexus™, Google Glass™
- Motorola® : Moto X™
- Oculus VR® : Oculus Rift
- Optinvent®
- Robodent®
- Samsung® : S-Voice™
- Vuzix®

Source des photos

- Figure 3
  - La réalité augmentée. Gadget, ou révolution ?
    http://augmentedmedia.net/2011/05/10/la-realite-augmentee-gadget-ou-revolution/
  - Garmin HUD+ (Head-Up Display)
    Lien :
    https://buy.garmin.com/en-US/US/on-the-go/mobileaccessories/hud-head-up-display-/prod155059.html

- Figure 4 : Google Glass - How it Feels
  Lien : http://www.google.com/glass/start/how-it-feels/

- Figure 5 : Site officiel de Layar
  Lien : https://www.layar.com/products/app/

- Figure 7 : Brevet du Sensorama par Morton HEILIG

- Figure 8 : Site internet de KARMA
  Lien : http://monet.cs.columbia.edu/projects/karma/karma.html

- Figure 12 : Handy AR: Markerless Inspection of Augmented Reality Objects Using Fingertip Tracking / Taehee Lee, Tobias Höllerer

- Figure 15 : Chirurgie implantaire sans lambeau,intérêts de la robotique passive système Robodent®, Réalités Cliniques vol. 20 n°4 2009

- Figure 16 : Image sous licence libre

- Figure 17 : Image sous licence libre

- Figure 18 : Image sous licence libre

- Figure 19 : Angeline Stewart pour Wikimedia Commons

- Figure 20 et 21 : Site officiel de l'EyeTap
  Lien : http://www.eyetap.org/research/eyetap.html

- Figure 22 et 23 : Site officiel d'Optinvent
  Lien : http://optinvent.com/see-through-glasses-ORA

- Figure 24 et 25 : Site officiel de Laster
  Lien : http://laster.fr/products/seethru/

- Figure 26-29 : Site officiel de Vuzix
  Lien : http://www.vuzix.com/

- Figure 30 : Site officiel des Google Glass
  Lien : http://www.google.com/glass/start/

- Figure 31 et 32 : Site officiel des Meta Space Glasses
  Lien : https://www.spaceglasses.com

- Figure 33 : Page internet de l'epson moverio BT-200
  Lien : http://www.epson.fr/fr/fr/viewcon/corporatesite/products/mainunits/overview/12411

- Figure 34 : Site officiel de l'oculus Rift
  Lien : http://www.oculusvr.com/

- Figure 35 : Brevet déposé par Morton HEILIG pour le Telesphere mask
  Lien : http://www.mortonheilig.com/TelesphereMask.pdf

- Figure 36 : Site internet de Gilles SIMON
  Lien : http://www.loria.fr/~gsimon/francais.html

- Figure 37 :
  - Serguey BRIN sur Glassapp.org
    Lien: http://glass-apps.org/google-glass
  - SEE THRU : Les lunettes connectées à la française
    Lien : http://hitek.fr/actualite/see-thru-les-lunettes-de-realite-augmentee-version-fr_1473
  - Optinvent Ora smartglasses put Android on your face for €699
    Lien : http://www.pocket-lint.com/news/127955-optinvent

- Figure 41 et 42: Site officiel de l'IRCAD
  Lien : http://www.ircad.fr/recherche/rd/VR-Planning/

- Figure 43 : Photos tirées de la vidéo de présentation "La réalité Augmentée"
  Lien : http://www.canal-u.tv/video/science_en_cours/la_realite_augmentee_1996.150

- Figure 44 : Site officiel d'Aesthetech
  Lien : http://aesthetech.com/

- Figure 45 : Site officiel de Droiders
  Lien : http://www.droiders.com/portfolio/

- Figure 46 : Article "Special Glases help surgeons see cancer"
  Lien : https://news.wustl.edu/news/Pages/26496.aspx

- Figure 47 et Figure 48 : Treatment of phantom limb pain (PLP) based on augmented reality and gaming controlled by myoelectric pattern recognition: a case study of a chronic PLP patient / Max ORTIZ-CATALAN, Nichlas SANDER, Morten B. KRISTOFFERSEN, Bo HAKANSSON et Rickard BRANEMARK [2014]

- Figure 49 et Figure 50 : Image-Based Tracking of the Teeth for Orthodontic Augmented Reality / André AICHERT, Wolfgang WEIN, Alexander LADIKOS, Tobias REICHL et Nassir NAVAB - [2012]

- Figure 51 et - Figure 52 : Logo Augment et marqueur Augment
  Lien : http://augmentedev.com/

- Figure 86 : Site officiel de Google Glass
  Lien : http://www.google.com/glass/

- Figure 87 : Illustration tirée du site Internet de ThalmicLab
  Lien : https://www.thalmic.com/en/myo/

- Figure 88 : Site officiel de Google Glass
  Lien : http://www.google.com/glass/

Glossaire

Affichage tête haute (ATH) :	Interface projetée dans le champ de vision de l'utilisateur, lui permettant de ne pas quitter son sujet des yeux.
Application Programming Interface (API) :	Ensemble de fonctions fournies et documentées pour communiquer avec un logiciel tiers.
Blender :	Logiciel open source permettant la réalisation ou modification de modèles 3D.
Central Processing Unit - CPU :	Processeur central d'un ordinateur. Il peut théoriquement exécuter toutes les tâches de calcul.
Framework :	Librairie de fonctions aidant à l'élaboration d'un logiciel.
Graphic Processing Unit - GPU :	Puces destinées au calcul 3D et matriciel.
Head-Mounted Display (HMD) :	Écran destiné à être porté sur la tête de l'utilisateur.
Head Up Display (HUD) :	Voir ATH.
Marqueur ou traceur :	Objet servant à repérer la position d'une entité ou de l'utilisateur dans l'espace.
Modèle Surfacique :	Modèle 3D défini par les coordonnées des points composant sa surface.
Modèle Volumique :	Modèle 3D défini par une multitude de volumes (voxel).
Organic Light Emitting Display (OLED):	Technologie d'écran utilisant des LED pour l'affichage des sous-pixels.
Open Graphic Library (OpenGL):	Librairie de fonctions graphiques permettant des rendus en trois dimensions.
Open Source (logiciel):	Logiciel dont le code source est ouvert et libre à la modification par des tiers, tout en respectant les termes explicités dans une licence.
Passe (de rendu) :	Fraction du rendu destinée à appliquer un effet (opacité, ombres, flou…) à une surface ou un volume.
Réalité Augmentée :	Superposition d'une couche d'informations virtuelles à une prise de vue réelle en temps synchrone
Rendu :	Action de compiler (calculer) les effets et les modèles en un résultat (image) final.
Shader :	Opération de transformation d'une surface, d'une texture ou d'un modèle réalisé par un GPU ou un moteur de rendu
Smartglass :	Lunettes connectées dites intelligentes ou enrichies en fonctionnalités.
Smartphone :	Téléphones dits intelligents ou enrichis en fonctionnalités. Le terme français le mieux adapté serait "Terminal".
Tracking :	Suivi de points, formes, motifs ou signaux sur une image ou dans un espace
Virtualité Augmentée :	Réalité augmentée permettant les interactions et modification du monde virtuel en fonction du monde réel
Voxel :	Volume servant d'unité, en trois dimensions (X,Y,Z), composant un modèle plus complexe

JENNY (Alexis) - Réalité augmentée : intérêts cliniques et pédagogiques en chirurgie dentaire / par Alexis JENNY - [S:l] : [S:n] - 2014 - [X] - 87 f : ill. ; 29,7 cm.
(Thèse : 3e cycle Sci. odontol. : Strasbourg : 2014 ; 25) N°43

Rubrique de classement : ODONTOLOGIE

Mots clés :
Réalité augmentée
Chirurgie assistée par ordinateur
Terminaux d'affichage
Interface humain/ordinateur
Imagerie tridimensionnelle

JENNY (Alexis) - Réalité augmentée : intérêts cliniques et pédagogiques en chirurgie dentaire.
(Thèse : 3ème cycle Sci. odontol. : Strasbourg : 2014 ; N°25) N°43.22.14.25

La réalité augmentée n'est pas un concept nouveau mais son application est récente. Le développement des smartphones, et bientôt des lunettes connectées, permet de mettre à disposition de tous, un matériel suffisamment fiable pour réaliser de la réalité augmentée, le plus souvent de façon ludique.

L'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD), situé à Strasbourg et dirigé par le Professeur Jacques MARESCAUX, a d'ores et déjà adapté cette technologie à une application médicale. A l'aide de caméras et d'ordinateurs, les médecins peuvent percevoir leurs instruments et les organes en 3D du patient, à travers la peau, en temps réel.

Le développement du Cone Beam permet aux chirurgiens-dentistes, de façon simple, d'accéder à des reconstructions 3D des structures osseuses : des bordures sinusiennes évidentes à la trajectoire du nerf mandibulaire, en passant par les trajectoires des canaux. Ces reconstitutions nous permettent dès à présent, d'explorer virtuellement le patient sur un écran d'ordinateur. La réalité augmentée nous permettrait de repositionner le scanner sur le patient, de façon à objectiver l'emplacement des structures durant une intervention, et de voir nos instruments se projeter à travers les tissus, alors qu'ils ont disparu de notre champ de vision. L'incorporation de protocoles nous permettrait d'augmenter la réalité d'informations didactiques directement sur le patient, ou plus aisément sur des modèles de travaux pratiques.

L'objectif de ce travail est d'élaborer un protocole préliminaire permettant d'explorer des modèles virtuels issus d'un examen d'imagerie médicale en réalité augmentée, de présenter différents concepts d'applications dans notre profession, de mettre en avant les difficultés de mise en place et de proposer quelques pistes pour les résoudre.

Me SH :
Augmented Reality
Surgery, Computer-Assisted
Video Display Terminals, Computer Terminals
User-Computer Interface
Imaging, Three-Dimensional

JURY :

Président : Monsieur le Professeur FEKI Ahmed

Assesseurs : Monsieur le Docteur JOERGER Roger
Madame le Docteur BAHI-GROSS Sophie
Monsieur le Docteur LUTZ Jean-Christophe
Monsieur le Docteur REYS Guillaume

ADRESSE DE L'AUTEUR

Alexis JENNY, 14 rue du docteur François, 67000 Strasbourg