

Master of Science HE-ARC in Engineering  
Espace de l'Europe 1  
CH-2000 Neuchâtel

# Master of Science HES-SO in Engineering

Orientation : Développement Logiciel et Multimédia (DLM)

## Travail de Bachelor N°213

Fait par :

Gabriel Griesser

Sous le direction de :

Prof. Dr. Stéphane Gobron  
Haute Ecole Arc, HES-SO

# Remerciements



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Situation initiale . . . . .	1
1.2 Objectifs . . . . .	1
1.3 Démarche . . . . .	2
<b>2 État de l’art</b>	<b>3</b>
2.1 L’haptique . . . . .	3
2.2 Technologie haptique . . . . .	5
2.3 Dispositifs haptiques . . . . .	6
2.4 Domaines d’activités, recherches et implémentations . . . . .	8
2.5 En réalité virtuelle . . . . .	11
2.6 Classification des différents matériels haptiques pour ce projet . . . . .	14
2.7 Résumé . . . . .	17
<b>3 Spécifications</b>	<b>19</b>
3.1 Unity . . . . .	19
3.2 Gants SenseGlove . . . . .	20
3.3 Gants Senso . . . . .	21
3.4 Gants Hi5 VR Glove . . . . .	22
3.5 Gants Avatar VR . . . . .	24
3.6 Joystick Falcon . . . . .	25
3.7 Finalisation . . . . .	26
<b>4 Analyse</b>	<b>27</b>
<b>5 Conception</b>	<b>29</b>
<b>6 Realisation</b>	<b>31</b>
<b>7 Tests</b>	<b>33</b>
<b>8 Conclusion</b>	<b>35</b>
<b>Annexes</b>	<b>V</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Situation initiale

La réalité virtuelle permet aux utilisateurs de s’immerger dans un autre monde de façon plus ou moins efficace : plus les sens sont crédibles (audio, vision, toucher...) meilleure est l’immersion. De nombreuses études ont montré que les résultats des mouvements d’exploration ont une grande importance sur nos perceptions. Effectivement, de nombreuses informations peuvent être apportées par le toucher. De la texture de l’objet jusqu’à sa forme et sa taille en passant par la température, la dureté du matériau ou encore son poids, toutes ces propriétés résultent donc d’un des cinq sens du corps humain : le toucher. **L’haptique** désigne cette science du toucher. Elle englobe à la fois le toucher et la perception du corps dans l’environnement (phénomènes kinesthésiques).

Dans le domaine de l’informatique, il est maintenant possible de représenter ce sens dans des applications. En effet, des dispositifs haptiques ont été créés grâce à une interface de contrôle (joysticks, manettes avec retour de force, gants haptiques, etc.). Ils sont principalement destinés à l’apprentissage ou réapprentissage de gestes métiers ou de gestes de la vie quotidienne. L’utilisateur est très souvent impliqué physiquement dans un environnement où ses gestes et actions auront un impact direct dans le monde virtuel qui l’entoure.

### 1.2 Objectifs

L’idée du projet est la suivante : une application a été développée sous Unity. Les systèmes de simulation, d’audio et de 3D fonctionnent très bien. Nous souhaitons y rajouter un domaine : **le toucher digital (ou haptique)**. Cet ajout se fera par le biais de cinq dispositifs haptiques présentés sous forme de gants et joystick. L’ensemble de ces cinq servira donc à l’intégration d’un troisième sens pour notre application : l’haptique.



FIGURE 1.1 – Logo Unity

### 1.3 Démarche

La réalisation de ce travail de Bachelor se déroule en trois étapes.

Premièrement, recherche et commande du matériel ainsi que l'immersion dans l'haptique. Le groupe Imagerie souhaitant investir, une recherche approfondie du matériel est indispensable. Pour ce projet, nous serons en possession de cinq dispositifs haptiques différents, tous compatibles avec le logiciel Unity. La recherche des différents dispositifs est documentée puis présentée aux professeurs responsables afin de commander au plus vite le matériel nécessaire.

Et parallèlement à cette recherche de matériel, il s'agira donc aussi de s'immerger dans le domaine de l'haptique en effectuant une étude à la fois sur la science du toucher et sur les différents dispositifs haptiques existants. La description, les avantages et inconvénients, les problèmes, contraintes et limites de chaque dispositif seront analysés et étudiés.

La deuxième partie du projet sera de se familiariser avec l'utilisation des dispositifs haptiques ainsi qu'avec leurs intégrations dans une application donnée. Cette dernière, développée par nos soins avec le moteur de jeu Unity, offrira une structure adéquate permettant l'intégration des différents gants et joysticks afin de démontrer leurs propriétés haptiques. Le but de cette partie est de tester, intégrer et utiliser les cinq interfaces haptiques à notre disposition. L'intégration doit se faire au mieux afin d'exploiter les caractéristiques de chaque dispositif. La réussite d'une simple preuve de concept permettra déjà d'avoir une représentation de la capacité de l'ensemble de notre matériel haptique et offrira notamment de nombreuses opportunités futures.

La troisième et dernière partie concerne la documentation sur l'intégration et l'utilisation de ces interfaces. Cela correspond à la synthèse écrite de la deuxième partie. Chaque étape d'intégration, difficulté rencontrée et observation est documentée. Ce document permettra à quiconque souhaitant utiliser un de ces dispositifs haptiques de se renseigner sur son fonctionnement.

# Chapitre 2

## État de l'art

### 2.1 L'haptique

En 1966, J. J. Gibson [1] définit cinq systèmes perceptuels distincts : Le système d'orientation de base (qui est responsable du maintien de l'équilibre corporel), le système auditif, le système d'odorat et de goût, le système visuel et l'haptique (le toucher). Le mot haptique est dérivé du mot grec "haptesthai" [2].

Comme décrit dans le chapitre 1.1, l'haptique désigne **la science du toucher**. Dans notre cas, cette dernière décrit les interactions sensorielles entre le réel et le virtuel, entre le doigt et l'écran, entre **l'utilisateur et son monde virtuel**. Cette science ne concerne pas exclusivement le toucher du bout du doigt, mais peut fonctionner avec n'importe quelle partie du corps. Cependant, la première utilisation de l'haptique passe essentiellement par la main et les doigts grâce auxquels nous pouvons interagir, via le toucher, avec le monde qui nous entoure.

L'haptique peut être différenciée en deux catégories de perceptions : la perception cutanée et la perception tactilo-kinesthésiques [3].

- La **perception cutanée** est le résultat de la simulation d'une partie de la peau alors que le segment corporel qui la porte est totalement immobile. Par exemple, lorsque la main est posée sur une table et qu'un objet pointu parcourt sa paume. Le traitement perceptif ne concerne que les informations cutanées liées au stimulus appliqué sur la main.
- La **perception tactilo-kinesthésique** résulte de la stimulation de la peau grâce aux mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec des objets. Par exemple, quand la main parcourt un objet pour en définir la forme, la texture ou la taille. C'est cette partie-là qui nous intéressera pour le projet.

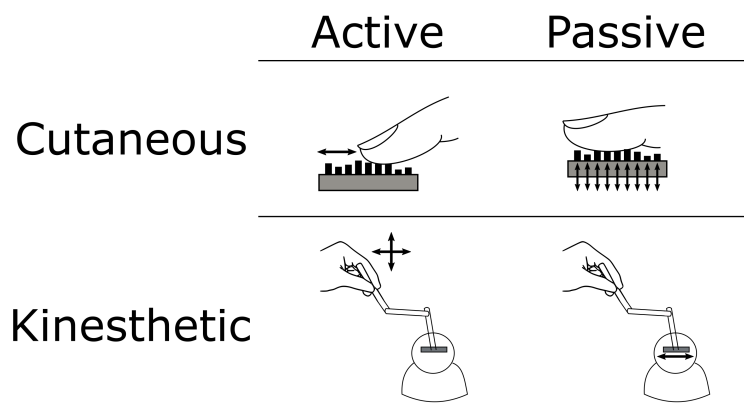


FIGURE 2.1 – Haptique actif et passif [4]

Nous pouvons également identifier des procédures exploratoires, c'est-à-dire des ensembles spécifiques de mouvement permettant la récolte d'informations en fonction des propriétés auxquelles ils sont adaptés. Par exemple, le **soulèvement** est lié au **poids de l'objet**, le **frottement** informera l'utilisateur sur la **texture**, et la **pression** donnera la **dureté du matériau**. Et enfin, nous avons le **contact statique** qui informe plus généralement sur la **température** mais aussi sur la **taille**, la forme, la texture et la dureté de l'objet. Chacune de ces actions est optimale pour la perception recherchée. Par exemple, le frottement latéral nous donnera un meilleur ressenti de la texture que le contact statique. Idem pour le soulèvement qui est le meilleur moyen pour se faire une idée sur le poids d'un objet [5, 6].

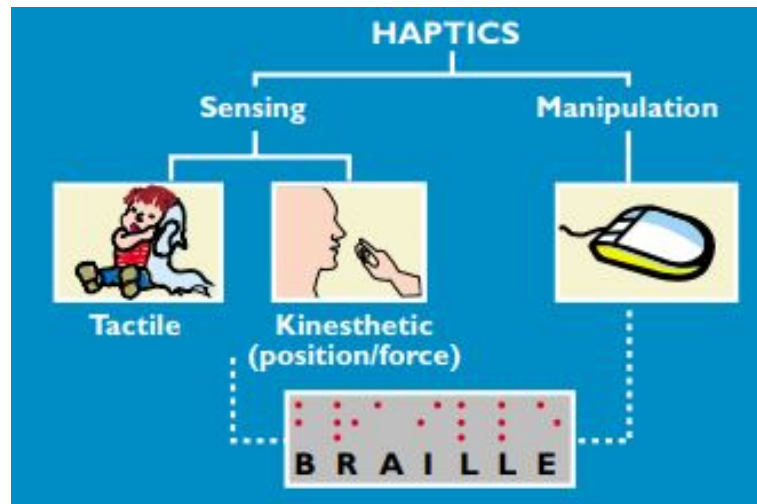


FIGURE 2.2 – Définition de l'haptique [7]



## 2.2 Technologie haptique

La technologie haptique est une rétroaction tactique qui tire parti du sens du toucher de l'utilisateur en lui faisant ressentir des forces, des vibrations et des mouvements par le biais d'une interface. Les technologies haptiques sont, pour le moment, souvent utilisées pour ressentir un contact lors de manipulation d'objets dans un monde virtuel en 3D. A court terme, cette technologie permettra aux utilisateurs de s'immerger dans leurs environnements virtuels souvent visualisés grâce à un casque de réalité virtuelle.

Parallèlement à cette utilisation, cette technologie peut être tout aussi bien exploitée dans des cas réels en faisant abstraction d'un monde virtuel. Par exemple, la société Apple a développé sa technologie « 3D Touch », une nouvelle dimension du tactile grâce à un ajout de capteurs de pression situés sous l'écran [8]. A défaut des systèmes visuels et auditifs existants, les **interfaces haptiques** permettent une **perception couplée à une interaction avec le milieu virtuel** [9]. Encore en plein développement, ces dispositifs s'approchent avec difficulté d'une restitution fidèle des sensations tactiles [10]. En effet, la diversité et la complexité des sensations tactiles humaines sont encore difficilement reproductibles dans leurs totalités par l'outil informatique.

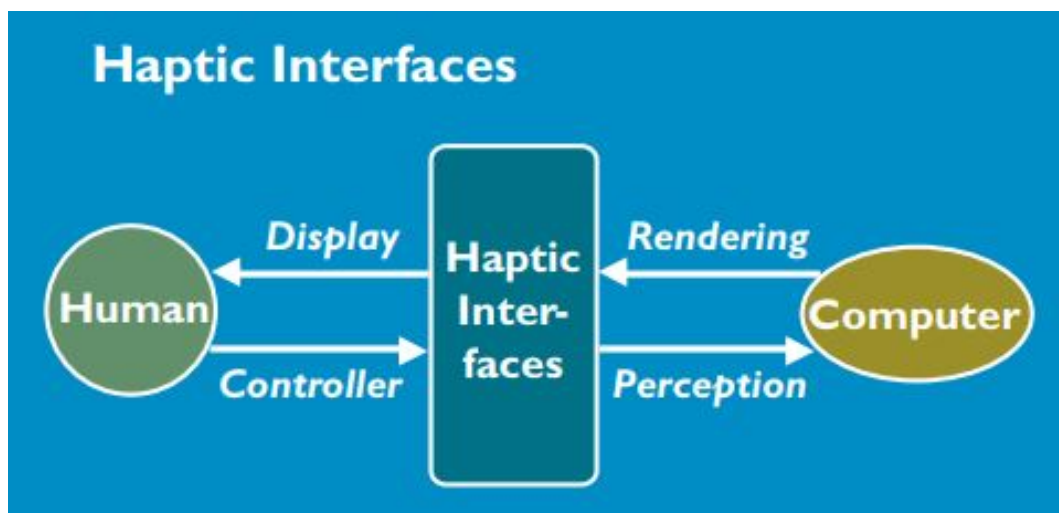


FIGURE 2.3 – Technologie haptique représentée par une interface [7]

## 2.3 Dispositifs haptiques

L'idée d'utiliser le toucher comme moyen de communication a été popularisée par Craig et Rollman (1999) et Sherrick (1985) :

*"Our understanding of how simple patterns combine to yield the complexity needed to increase channel capacity for continuous information streams is still primitive." [6]*

Dans le cadre de la réalité virtuelle, il est maintenant possible de représenter le toucher en liaison directe avec une application. Des dispositifs haptiques ont été créés grâce à une interface de contrôle comme le joystick, la manette avec retour de force, la paire de gants haptiques mais aussi les vêtements et les combinaisons haptiques. Pendant de nombreuses années, les seuls dispositifs de retour haptique pour la main ont été le CyberGrasp<sup>TM</sup> d'Immersion Corp (maintenant CyberGlove Systems) [11, 12] et le Master II de Rutgers University [13]. Aucun d'entre eux n'a connu de succès commercial.



FIGURE 2.4 – Gant CyberGrasp



FIGURE 2.5 – Gant Rutgers Master II

Les gants haptiques actuels sont des systèmes tactilo-kinesthésiques physiques ou mécaniques permettant de créer une communication entre un humain et son environnement virtuel. Cette communication permet aux utilisateurs de concevoir, modeler et manipuler des objets non existants mais représentés de manière fidèle. Certains matériels de jeux-vidéos utilisent le retour de force qui est utilisé comme retour sensoriel dans les systèmes de réalité virtuelle.

Les interfaces haptiques sont divisées en deux catégories principales [14] :

- Le retour de force
- Le retour tactile

Le retour de force concerne les interfaces utilisées pour explorer et modifier des objets distants/virtuels en trois dimensions physiques dans un environnement virtuel. Cette première catégorie est souvent utilisée dans des applications telles que la conception assistée par ordinateur, la chirurgie assistée par ordinateur et l'assemblage assistée par ordinateur. Les interfaces offrant un système de retour de force sont principalement représentées sous la forme d'exo-squelette permettant ainsi la simulation de forces appliquées à divers endroits du matériel. C'est grâce à ce système que l'utilisateur pourra ressentir la taille, la dureté du matériau mais aussi le poids de l'objet.

Le retour tactile lui, est une caractéristique présente dans les interfaces possédant une couverture textile, souvent représentées sous la forme de gants traditionnels, qui permet de traiter des propriétés de surface telles que la rugosité, la température et la douceur de l'objet. Ces propriétés sont traitées grâce à la composition textile et matérielle du dispositif haptique.

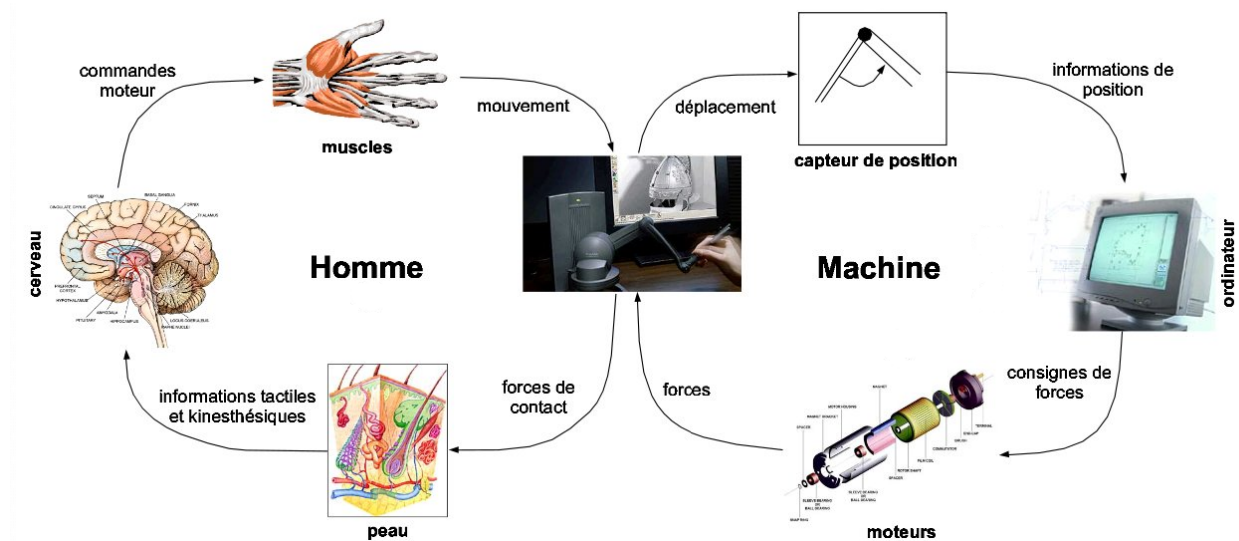


FIGURE 2.6 – Configuration basique des dispositifs haptiques. Casiez, 2004

Comme schématisé dans la figure 2.6, le système haptique se compose principalement de deux parties :

- Partie humaine
- Partie machine

La partie humaine est responsable du contrôle de la position et de la rotation des mains et des doigts, pendant que la partie machine applique les forces sur la main ou sur les doigts de manière à simuler le contact avec un objet réel le plus fidèlement possible. Les deux systèmes sont équipés de capteurs, processeurs et actionneurs. La machine verra ces fonctions assurées par les codeurs, l'ordinateur et les moteurs. Respectivement, dans le cadre du système humain, les récepteurs nerveux situés sur la peau effectuent la détection de l'objet, le cerveau analyse les données transmises, effectue leurs traitements et en retour, les muscles se chargent de la motricité en réalisant le mouvement [9, 14]. Afin de bien différencier les différentes propriétés de la partie machine, nous pouvons distinguer trois performances :

- La stabilité
- La transparence
- La résolution de position

La stabilité correspond à la capacité de reproduction d'un objet, d'un mur ou d'un obstacle virtuel de telle sorte que l'utilisateur ne puisse ni le traverser, ni « l'endommager ». Le dispositif doit avoir la capacité de reproduire une raideur de contact. Cela est ressenti au niveau sensoriel par le retour de force dans la plupart des gants haptiques.

La transparence est la qualité qui permet à l'utilisateur d'oublier qu'il est muni d'un matériel haptique lorsqu'il manipule des objets virtuels. Il doit idéalement pouvoir plonger dans son environnement virtuel sans ressentir la dynamique de l'interface haptique. C'est-à-dire que le poids, le frottement, l'inertie, la facilité de mouvement, etc. du dispositif haptique ne doivent pas être perçus par l'utilisateur.

Et enfin, la résolution de position vise la précision du dispositif. Elle est définie par la plus petite quantité de mouvement grâce à laquelle les capteurs détectent un changement de position. Une bonne résolution de la position est un paramètre important dans la démonstration de la rigidité des murs virtuels.

## 2.4 Domaines d'activités, recherches et implémentations

La technologie haptique promet d'avoir de vastes applications comme elle l'a déjà fait dans certains domaines. Par exemple, cette technologie a permis d'étudier en détail le fonctionnement du sens du toucher humain en permettant la création d'objets virtuels haptiques soigneusement contrôlés.

La perception et l'interaction entre une personne et son environnement virtuel intéressent des grandes entreprises telle que Bosh ou le centre de recherche Disney Research dans le cadre de nombreux domaines d'activité. Par exemple, dans l'automobile, un clic sur un bouton tactile permettrait de ressentir la même sensation que lors d'un clic sur un bouton réel. Le conducteur aurait donc moins besoin de regarder l'écran et cela améliorerait sa sécurité.

En 2013, Disney a travaillé sur une technologie nommée Aereal [15]. Ce système permettait une rétroaction haptique sans contact grâce à l'utilisation d'anneaux vortex d'air. Selon Disney, Aereal aide les utilisateurs à expérimenter des textures et à « toucher » des objets virtuels en 3D dans un espace libre, le tout sans avoir besoin de gant ou de dispositif haptique physique.

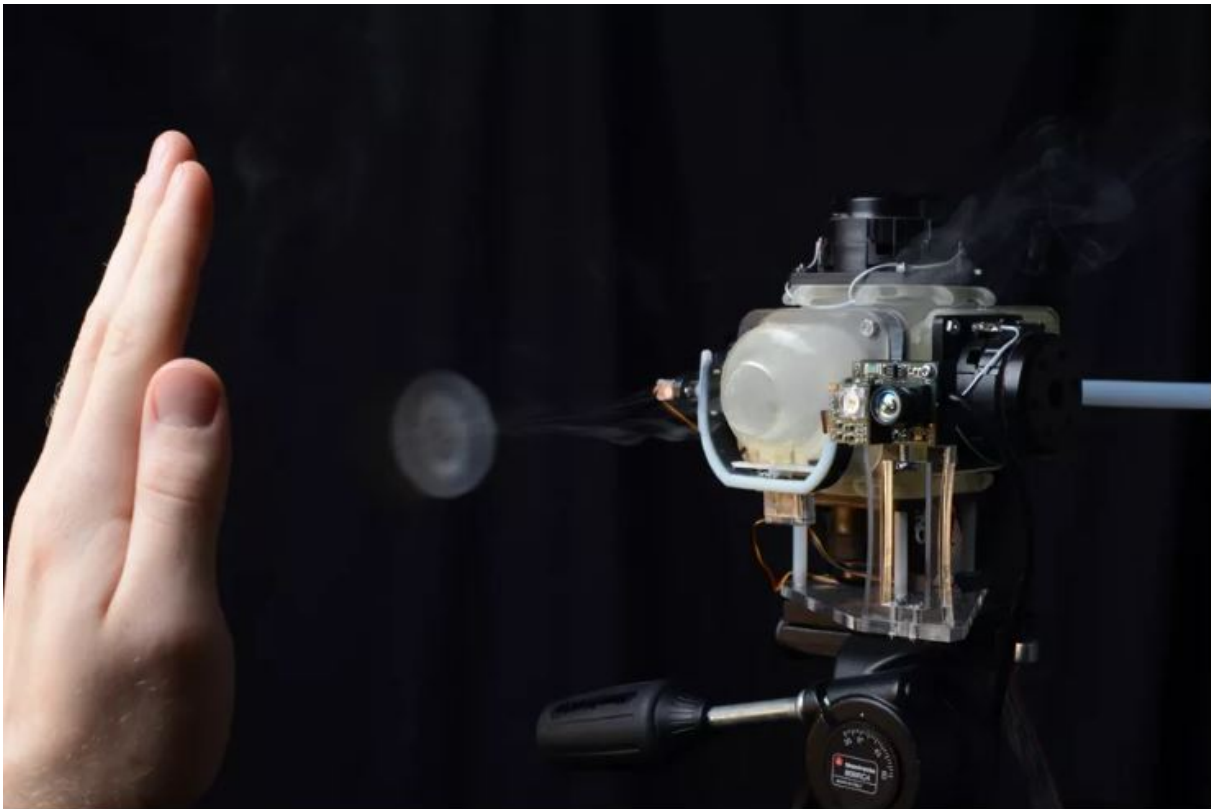


FIGURE 2.7 – Système de Vortex pour Disney Aereal [15]

Dans un tout autre domaine, l'industrie pornographique, la société Kiiroo a développé des accessoires masturbatoires connectés pour homme et femme. Ces objets haptiques, directement connecté à un casque de réalité virtuelle, permettent à leurs utilisateurs un ressenti plus réel qu'une simple image couplée à un son.

En robotique, le Shadow Hand [16] utilise le sens du toucher, de la pression et de la position pour reproduire la force, la délicatesse et la complexité de la prise manuelle. Développé par une équipe d'ingénieurs à Londres, le programme continu d'être le sujet de recherches et de développements dont le but est de compléter le premier humanoïde artificiel convaincant. On peut voir un premier prototype dans la collection de robots humanoïdes de la NASA [17].



FIGURE 2.8 – La main Shadow C6M Smart Motor devant la main Shadow C3 Dexterous Air Muscle



FIGURE 2.9 – Le Robonaut 2 de la Nasa peut soulever des poids d'environ 9kg



La technologie haptique est très intéressante aussi dans le domaine de la médecine et de l'apprentissage ou rééducation de gestes professionnels liés à un métier ou de gestes de la vie quotidienne. Le patient utilisateur est impliqué physiquement dans un processus de réapprentissage où ses gestes et actions auront un impact direct dans l'environnement virtuel [18, 19]. L'accessibilité à ce domaine pour les personnes handicapées est un outil supplémentaire pour leur réadaptation comme le montre cette étude [20] liée aux personnes non-voyantes.



FIGURE 2.10 – Prototype d'un système de réhabilitation basé sur l'haptique [21]

En médecine, des scientifiques ont tenté avec succès l'utilisation d'un dos haptique virtuel dans le programme d'études de l'Ohio augmentant ainsi les qualités palpatoires du praticien (médecin, physiothérapeute, ostéopathe) [22]. Aussi, les interfaces haptiques dans l'apprentissage chirurgicale par simulation peuvent s'avérer particulièrement utiles lors d'interventions peu invasives comme la laparoscopie, la radiologie interventionnelle [23] ainsi que la chirurgie à distance [24]. Un avantage particulier de ce type de travail est que les chirurgiens peuvent effectuer plus d'opérations avec un stress et une fatigue moindres.



FIGURE 2.11 – L'haptique peut simuler la sensation de différents types de tissus [25]

## 2.5 En réalité virtuelle

Dans le domaine de l'informatique, tout est visualisé par une interface affichant ce que le programmeur a créé. Ce monde virtuel est en opposition avec le monde qui nous entoure. En informatique, l'appellation haptique est utilisée pour des interfaces qui renvoient la perception du toucher à l'utilisateur.

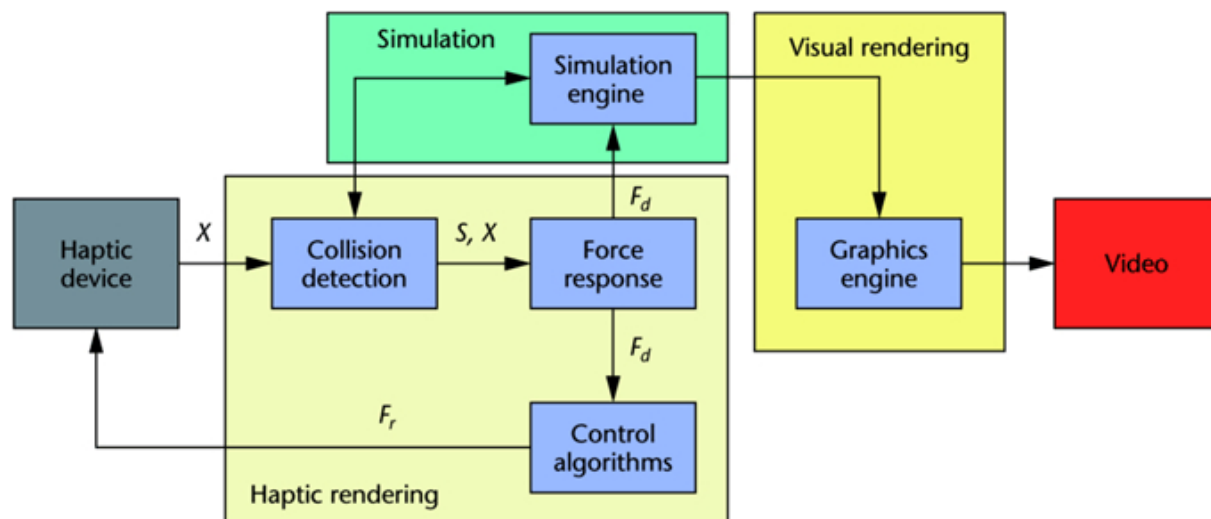


FIGURE 2.12 – Diagramme de blocs d'un système haptique [26]

La figure 2.12 est constituée de trois blocs. Le rendu haptique (haptic rendering), le rendu visuel (visual rendering) et la simulation. Le rendu haptique est lui-même divisé en trois blocs [14, 27].

**L'algorithme de détection de collision** : détecte la collision entre l'objet virtuel et l'utilisateur pour renvoyer les informations.

**L'algorithme de réponse de force** : calcule les interactions entre les objets virtuels et l'utilisateur quand une collision est détectée. [28]

**L'algorithme de contrôle** : sert de contrôleur pour commander le dispositif haptique afin de minimiser les erreurs entre un retour de force idéal et un retour de force immersif. [29]

De tous les dispositifs de réalité virtuelle, le gant haptique est à la fois le plus recherché et le plus complexe à développer [30]. En effet, chaque humain a non seulement une taille et une forme de main uniques, mais aussi une paire de mains qui n'est ni identique ni symétrique. De plus, la main est l'une des parties les plus sensibles du corps. Elle est capable de percevoir des détails subtiles mais peut aussi développer une force importante [30].

En informatique et plus précisément dans le cadre des gants haptiques, il est important de distinguer le toucher **tactile** du toucher **kinesthésique**. Les dispositifs à retour tactiles tentent de recréer la sensation d'une forme, d'une texture ou même des propriétés thermiques d'un objet virtuel. Les dispositifs à retour kinesthésiques appliquent des forces directement sur la main l'utilisateur. Ils créent une impression de mouvement et/ou de résistance à travers les muscles. Ces deux sensations tactile et kinesthésique sont également présentes lorsqu'on touche un objet dans la vie réelle [30].

Les principales exigences de l'utilisateur d'un gant haptique sont les suivantes : le gant doit fournir un retour tactile et kinesthésique, il doit être léger, ergonomique et ne doit pas entraver les mouvements naturels des doigts [30]. Étant donné la nécessité de la production en grand nombre pour atteindre un prix de marché acceptable, les gants doivent soit s'adapter à une taille et une forme arbitraire de la main type standard, soit être adaptés à différents utilisateurs grâce à une sélection de tailles différentes pour les gants. Malgré des tailles différentes, cela reste compliqué car les actionneurs ou capteurs doivent être placés très précisément par rapport à l'anatomie de l'utilisateur, toujours dans le but de ressentir avec le plus de finesse et d'exactitude possible l'objet virtuel. Dans le cadre de gants textiles, il est facilement réalisable de faire des gants de tailles différentes (exemple : Hi5 VR Glove [31]). Par contre, pour les gants exo-squelettiques, il n'existe pas de tailles différentes, c'est un seul modèle standard (exemple : SenseGlove [32] ou HaptX [33]).



FIGURE 2.13 – Gant Hi5 VR Glove (ancien design)



FIGURE 2.14 – Gant SenseGlove

Une autre difficulté à propos des matériels haptiques concerne les caractéristiques de chaque interface. En effet, ces dernières étant développées par des entreprises différentes et possédant des propriétés différentes, les résultats ne seront pas les mêmes pour une même application donnée.

Par exemple : Je possède une application de lancer de pierre. La pierre pèse 6kg, a une température ambiante de 15 degrés celsius et possède une texture lisse.

Avec des gants **HaptX Glove** [33], je pourrais sentir la taille, poids, forme, température de la pierre et la prendre en main avec un ressenti de rigidité proche de la perfection. Cependant, ces propriétés sont mises au profit d'une ergonomie moins bonne étant donné la taille des gants et la connexion par câble pouvant limiter mon mouvement de lancer.

A contrario, si j'utilisais les **AvatarVR** [34], je ne ressentirais ni la température, ni la dureté du matériau. J'aurais, par contre, toujours la sensation d'avoir un objet lisse dans la main grâce au retour haptique et pourrais le lancer avec autant d'aisance que je le souhaite grâce à la connexion sans fil de ces gants.

Avec des **Falcon** [35], je n'obtiens pas un ressenti de la pierre elle-même dans ma main mais je pourrais ressentir son poids, propriété que les gants cités ci-dessus n'offrent pas. En dépit de cela, ces interfaces sont représentées sous forme de joystick et donc « cassent » l'immersion dans le monde virtuel.



Une étude et une comparaison ont été faites dans un centre de recherche informatique entre les gants haptiques Rutgers Master II et les CyberGrasp. L'étude consistait à utiliser les gants Rutgers Master II afin de tester leurs caractéristiques et propriétés de retour haptique pour ensuite les comparer avec les gants CyberGrasp [13].

Variable	RMII-ND Haptic Glove	CyberGrasp Haptic Glove
<b><i>Sensing</i></b>		
Sensor placement	Built into actuators	Separate sensing glove
Sensor type	Non-contact (IR and Hall effect)	Resistive bend sensors
Sensor linearity	0.6% over full range	0.6% over full joint range
Sensor resolution	0.1 deg (Hall-eff); 0.3mm (IR)	0.5 degree
Sensor update rate	435 records/sec	112 records/sec
Interface	RS232 (115 kbaud max)	RS232 (115 kbaud max)
<b><i>Force Feedback</i></b>		
Maximum continuous force	16 N per finger (no force at pinkie)	12 N per finger (all fingers)
Minimum force	0.014 N (static actuator friction)	No data available
Force resolution	12 bit	12 bit
Actuator type	Pneumatic (direct drive)	DC Electric and cables
Bandwidth	500 Hz for control, 10 Hz at fingertip	No data available
Work-space	2 meter radius hemisphere	1 meter radius hemisphere
Exoskeleton weight	80 g	350 g
Finger range	Limited	Full hand closing
Safety	Actuator range	Adjustable mechanical stops
Size	One size fits most	One size fits most
Sensor update rate (angles and forces)	346 records/sec	No data available
Communication interface	RS232 (115 kbaud max)	RS232 (115 kbaud max)

FIGURE 2.15 – Tableau de comparaison entre les CyberGrasp et les Rutgers Master II

La conclusion de cette comparaison rejoint sur beaucoup de points notre étude sur les différentes propriétés des gants haptiques. Nous remarquons ainsi que la capacité de retour de force, que le poids, la portée des doigts et quelques autres propriétés n'étant pas les mêmes sur les deux gants, le ressenti et l'immersion provoqués sont totalement différents. Également basé sur une autre étude [30], nous observons que quelque que soit le gant utilisé dans une application, les résultats ne seront jamais parfaitement identiques à une deuxième paire malgré des caractéristiques sensiblement identiques.

## 2.6 Classification des différents matériels haptiques pour ce projet

Pour simplifier l'analyse, la classification suivante sera utilisée durant ce travail.

- Gants traditionnels
- Gants exo-squelettiques
- Joysticks

Bien que les différentes classes partagent les mêmes objectifs et contraintes, les trois catégories suivent des approches technique très différentes [30]. Les sections suivantes décrivent ces catégories ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Les **gants traditionnels** sont des gants relativement ergonomiques grâce à leur composition textile. Ils sont faits d'un tissu souple, généralement élastique, ils épousent la forme de la main et permettent aux doigts de bouger individuellement. Des capteurs de flexion et des actionneurs à retour haptique sont soit cousus dans le tissu, soit fixés à l'intérieur de ces gants. Les capteurs permettent de retranscrire la flexion des doigts alors que les actionneurs envoient une impression de résistance par le biais de retour haptique. La conception de ce type de gants est soumise à plusieurs problèmes :

Premièrement, les capteurs et actionneurs doivent être suffisamment petits afin de s'adapter à l'intérieur du tissu. Ils doivent à la fois être placés très près des doigts et à la fois se faire oublier lors de l'utilisation du gant.

Ensuite, les mouvement de l'utilisateur doivent être limités le moins possible. L'ensemble de l'équipement (gants, câble, connexion, etc.) doit donc être flexible et ergonomique. Cela inclus la taille et le poids du gant : un gant non câblé et plus léger, couplé à un casque de réalité virtuel, se fera oublier lors d'une utilisation dans un environnement virtuel.

Finalement, le gant doit pouvoir supporter de grandes déformations, c'est-à-dire supporter les étirements provoqués lorsqu'on l'enfile et qu'on le retire. Ces déformations subies par le gant ne doivent ni endommager sa structure ni affecter son fonctionnement.



FIGURE 2.16 – Gant traditionnel Avatar VR

Un **gant exo-squelettique** est une structure articulée que l'utilisateur porte sur sa main et qui transmet directement les forces aux doigts. Contrairement aux gants traditionnels, ces gants exo-squelettiques n'adoptent pas la même cinématique que les doigts car cela demanderait pour chaque utilisateur un ajustement très précis de la longueur des segments. A la place, ils possèdent une structure parallèle aux doigts sur l'extérieur de la main. Cette structure est composée d'un certain nombre de liaisons intermédiaires reliant l'exosquelette aux différentes phalanges de la main.

Le grand avantage de ces gants repose sur le retour de force. En effet, la structure exo-squelettique venant se poser par-dessus la main et les doigts, elle offre une sensation haptique bien plus puissante et réaliste que de simples gants. Quand des gants traditionnels simuleront le toucher par des vibrations ou une légère résistance à chaque doigt, les gants exo-squelettiques peuvent aller jusqu'à bloquer les doigts de l'utilisateur pour simuler le toucher. Un retour de force aussi puissant est obtenu par les liaisons reliant chaque phalange à l'exosquelette. Bien entendu, il faut se prêter au jeu et ne pas essayer de « casser » ce retour de force en exerçant une trop grande pression. Même avec un gant exo-squelettique, il sera dans certains cas aussi possible de ressentir la rigidité de l'objet, sa température et également son poids ainsi que d'autres propriétés.

Malgré leurs capacités, quelques contraintes sont à noter pour les utilisateurs. La principale concerne l'ergonomie. Effectivement, les gants exo-squelettiques sont souvent bien plus lourds et plus dérangeants que de simples gants. Quand pour un gant traditionnel l'utilisateur n'a qu'à l'enfiler, un gant exo-squelettique est soumis à une mise en place plus complexe, allant du juste positionnement sur la main jusqu'à la connexion par câble(s) jusqu'à l'ordinateur. Lors de leurs premières utilisations, ces gants volumineux peuvent déranger le porteur. A l'encontre des gants précédents, ceux-ci ne se font pas facilement oublier lors de leurs utilisations, même couplés à un casque de réalité virtuelle.



FIGURE 2.17 – Gant exo-squelettique HaptX

La troisième catégorie, les **joysticks** diffère totalement des deux premières. Nous ne parlons plus de gants mais de manettes. Ces dernières offrent une sensation et une immersion bien moins grande qu'avec des gants mais permettent toutefois un ressenti, caractérisé par un retour de force conséquent. Avec leurs prises en main aisées, les joysticks sont un des premiers dispositifs utilisés permettant liaison haptique entre l'utilisateur et son environnement virtuel. Ils se présentent sous différentes formes, chacune ayant leurs propriétés et caractéristiques propres. Dans le cadre de notre projet, nous utiliserons les Falcons de la firme Novint [35]. En dépit d'une forme qui peut paraître complexe et douteuse, ce matériel permet une reproduction des gestes en trois dimensions, un ressenti du poids de l'objet (propriété rare dans le domaine de l'haptique) et possède un système de retour de force à l'instar des gants exosquelettiques.

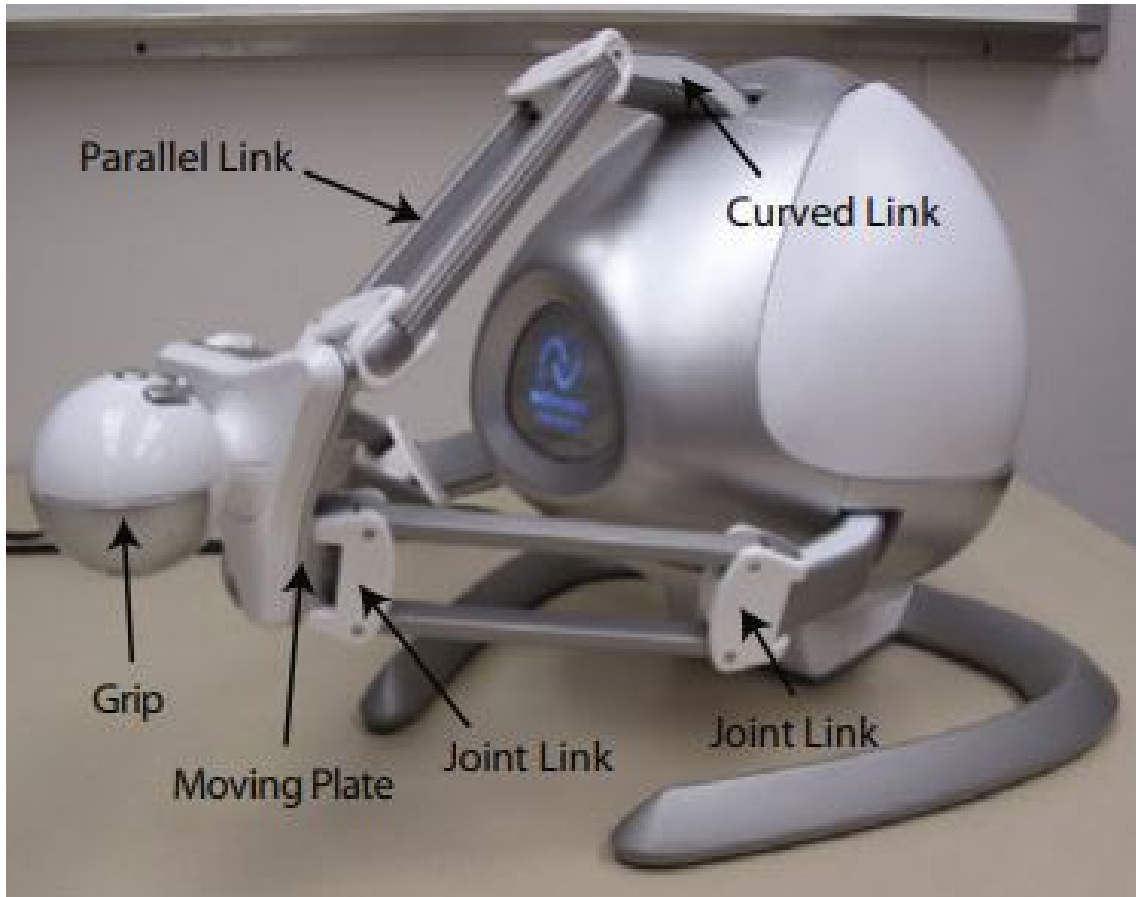


FIGURE 2.18 – Cinématique du Falcon basée sur [36]

Les Falcons ont pendant longtemps été une référence dans le domaine des interfaces haptiques. De nombreuses études ont été menées sur ces dispositifs comme par exemple la création d'un dispositif haptique à 5 degrés de liberté en partant de deux Falcons [37] ou encore la modélisation haptique pour les non-voyant à l'aide du Falcon. [20]

## 2.7 Résumé

En partant d'une science résultant de l'un des cinq sens du corps humain, le toucher, l'haptique fait, d'une part partie de notre vie quotidienne en nous donnant, grâce à la perception cutanée et tactilo-kinesthésique des informations concernant l'environnement et les objets qui nous entourent, d'autre part, fait aussi partie intégrante d'études et de recherches sur son domaine dans le monde entier. Comme vu dans la section 2.1, l'haptique désigne la science du toucher permettant à l'humain de prendre connaissance du monde qui l'entoure notamment grâce à des procédures exploratoires. Cela concerne le monde réel, mais qu'en est-il du monde virtuel ?

Dans ce deuxième cas, l'haptique désigne les interactions sensorielles entre l'utilisateur et son environnement virtuel, créé avec pour seule limite l'imagination du développeur. Une implémentation de cette technologie haptique, couplée à d'autres sens comme l'audio et la vision, offre une meilleure immersion grâce aux informations apportées par le toucher et, pour des cas comme les serious game ou la médecine, optimise l'apprentissage ou réapprentissage de l'utilisateur. Cette immersion est le résultat d'informations données par des procédures exploratoires comme le soulèvement, le frottement ou encore la pression. Nous pouvons, aujourd'hui, reproduire la texture de l'objet, sa forme, son poids, sa taille, sa température et la dureté de son matériau grâce aux différents dispositifs haptiques.

La technologie haptique, mise au point par le biais d'interfaces haptiques, permet une perception de l'environnement virtuel associée à une interaction avec ce dernier. Ces interfaces haptiques, aussi appelées dispositifs haptiques, sont des systèmes tactilo-kinesthésiques physiques ou mécaniques permettant de créer une communication entre un humain et son environnement virtuel. Avec une capacité de retour de force et/ou de retour tactile, ces dispositifs sont généralement représentés sous trois formes : le gant traditionnel, le gant exo-squelettique et le joystick.

Pour ce projet, un document de comparaison a été réalisé afin d'avoir une vision d'ensemble sur les différents dispositifs haptiques connus à ce jour. Ci-dessous, un tableau récapitulatif de ce document, la version détaillée est disponible en annexe dans le fichier *EtudeComparative.pdf*.

Dispositif	Type	Connexion	Retour de force	Retour tactile	Hand tracking	Degré de liberté	SDK	Prix (\$)
Sense Glove	Exosquelette	Câblée	Oui	Non	Non	24	Unity / UE4	1200
Novint Falcon	Joystick	Câblée	Oui	Non	Non	3	-	~500
Avatar VR	Gants	Sans fil	Non	Oui	Oui	10	Unity / UE4	1500
DexMo	Exosquelette	Sans fil	Oui	Non	Non	11	Unity / UE4	12'000
HaptX	Exosquelette	Câblée	Oui	Oui	Oui	6	Unity / UE4	-
Hi5 Glove	Gants	Sans fil	Non	Oui	Oui	9	Unity / UE4	999
Senso Glove	Gants	Sans fil	Non	Oui	Oui	7	Unity / UE4	599
CyberGrasp	Exosquelette	Câblée	Oui	Non	Non	5	-	50'000
Plexus	Gants	Sans fil	Non	Oui	Oui	21	Unity / UE4	249

FIGURE 2.19 – Tableau récapitulatif des différents matériels haptiques



# Chapitre 3

## Spécifications

Ce chapitre décrit en détail chaque tâche de la section **intégration** du planning de Gantt. Ce dernier, disponible dans les annexes, contient la liste des étapes nécessaires au bon développement de ce projet. Nous utiliserons ici les cinq dispositifs haptiques suivants : les gants **Sense**, **Senso**, **Hi5**, **AvatarVR** et les joysticks **Falcons**.

### 3.1 Unity

#### — Recherche et étude pour une application.

L’objectif de cette tâche consiste à se faire une idée sur la direction que prendra notre application. Dans quel contexte se déroulera nos scènes et quels seront les objets avec lesquels nous pourrons interagir. Nous partirons ici sur une scène contenant une table sur laquelle seront déposés au moins cinq objets aux caractéristiques différentes de façon à tester un maximum les capacités de retour de force des gants haptiques. Un ou plusieurs boutons seront également ajoutés afin de promouvoir le retour tactile de certains gants. Cette scène sera ensuite dupliquée pour chaque matériel haptique utilisé, c’est-à-dire cinq fois.

#### — Recherche d’assets.

C’est ici que nous téléchargerons les assets nécessaires à la création de notre scène. Nous aurons principalement besoin du terrain, d’une vue en première personne ainsi que de plusieurs objets et boutons différents avec lesquels nous pourrons interagir. Les objets, le terrain et la vue en première personne seront téléchargés directement sur l’Asset Store de Unity à cette adresse <https://assetstore.unity.com/>. Les boutons quant à eux seront développés par nos soins pour en faire des prefabs réutilisables dans n’importe quelle scène.

#### — Développement de la structure de l’application

Une fois les assets téléchargés et les prefabs créés, il s’agira de les mettre en place afin d’avoir une première structure pour notre application. Nous ne toucherons pas encore au code, cette tâche consistera à déployer les gameObject et les positionner correctement dans notre scène. Chaque gant possèdera sa propre scène dont la structure sera créée durant cette tâche.

## 3.2 Gants SenseGlove



FIGURE 3.1 – Gant SenseGlove

### — Installation SDK / Tests des gants

Avant toute configuration et intégration, nous installerons le SDK Unity et effectuerons des tests complets sur les gants par le biais de la scène d'exemple Unity donnée par la société SenseGlove. Les tests couvriront le système de retour de force des gants. Le SDK et la scène de test sont disponibles sur le dépôt Github de la société à [cette adresse](#).

### — Recherche sur l'intégration, documentation et prise en main du SDK

C'est ici que nous effectuerons notre processus de recherche et de documentation concernant l'intégration des gants. Nous nous servons du wiki disponible sur le dépôt Github ([lien ici](#)) pour étudier et comprendre d'une part le fonctionnement du système haptique des SenseGlove, d'autre part la méthodologie d'intégration à notre projet Unity. Divers tests seront effectués sur une scène d'exemple afin d'optimiser la compréhension du code.

### — Intégration au projet Unity

Finalement, nous intégrerons ces gants dans une première scène de notre projet composée principalement d'objets de tailles, de formes et de rigidités différentes. Le modèle des mains sera le même que celui déployé dans le Github ci-dessus. Les SenseGlove possédant un système de retour de force, nous devons mettre en place cette capacité de la même façon que dans leur scène d'exemple mais cette fois dans notre propre scène avec nos objets.



### 3.3 Gants Senso



FIGURE 3.2 – Gant Senso

#### — Installation driver / SDK / Tests des gants

Les gants Senso étant reliés au PC par une connexion sans-fil, ils nécessitent l'installation d'un driver pour fonctionner. Ce dernier, disponible à [cette adresse](#) ne fonctionne que pour Windows 7 et les versions supérieures. Une fois le driver installé en suivant les étapes de [la documentation](#), nous passerons à la phase de test. Elle sera divisée en deux étapes : la première concerne les tests de drivers et de reconnaissance des gants qui se font par le biais de l'application *SENSO\_UI* disponible dans le dossier du driver. Si l'installation du driver s'est correctement passée, les gants devraient être reconnus, calibrés et prêts à être utilisés. La deuxième phase de test implique l'utilisation d'une application graphique appelée *Senso Hands Demo* avec laquelle nous pourrions effectuer nos premières interaction en temps réel et par la même occasion, finaliser les tests de bon fonctionnement des gants. Finalement nous passerons à l'installation du SDK (qui est en réalité un plugin) disponible à [cette adresse](#) dont l'utilisation nécessite simplement une importation dans notre projet Unity.

#### — Recherche sur l'intégration, documentation et prise en main du SDK

Comme pour les SenseGlove, nous passerons quelques jours sur l'étude concernant l'intégration des gants. Une page de documentation sur le plugin Unity est disponible [ici](#). La technologie haptique de ces gants étant composée uniquement d'un système de retour tactile, l'interaction entre l'utilisateur et son environnement virtuel se résultera seulement par de simples vibrations.

#### — Intégration au projet Unity

La phase d'intégration commencera par la création d'une nouvelle scène reprenant la structure mise en place quelques tâches auparavant. Cette scène sera donc composée d'objets et de boutons. En effet, les Senso ne fournissent pas de système de retour de force mais uniquement un système de retour tactile caractérisé par des vibrations à chaque doigt de la main ainsi qu'au poignet. Un ou plusieurs boutons seront donc plus adaptés à l'utilisation de ces gants que des objets.

### 3.4 Gants Hi5 VR Glove



FIGURE 3.3 – Gant Hi5 VR Glove

#### — Installation SDK / Tests des gants

Comme pour les deux premiers gants, les Hi5 nécessitent un SDK disponible sur le [site internet](#) de la société Noitom pour les intégrer à Unity. Nous commencerons donc par le télécharger et tester son bon fonctionnement en l'important directement dans notre troisième scène. Parallèlement à ça, nous effectuerons les tests des Hi5 par le biais des applications *Hi5 Calibration Sample Scene* et *Hi5 Unity Interaction Sample* (toutes deux disponibles sur le lien ci-dessus) permettant à la fois la reconnaissance des gants et l'utilisation de ces derniers. Les Hi5 étant pensés pour être utilisés avec des VIVE Tracker, nous serons peut-être dans l'obligation de mettre en place ces contrôleurs pour le bon déroulement des tests.

#### — Installation et configuration des Vive Tracker (optionnel)

Les Vive Tracker sont des contrôleurs permettant le tracking en temps réel de l'objet auquel ils sont attachés. Dans le cadre des Hi5, ces derniers possèdent une monture permettant d'attacher directement les Vive Tracker aux gants. Le système de tracking demande à être installé et configuré afin de garantir la reconnaissance par l'ordinateur et donc par l'application de test. Cette tâche est optionnelle car l'utilisation des Vive Tracker n'est en aucun cas obligatoire exceptée par certains tests de calibrations et/ou de position nécessitant leurs systèmes de tracking. L'installation et configuration de ces contrôleurs se fera uniquement pour la phase de test des gants. Notre projet s'intéresse seulement à l'intégration des gants et à l'utilisation de la technologie haptique les composant. Si toutefois le temps le permet, une intégration complète des Vive Tracker dans notre projet pourra être envisagée.

## — Recherche sur l'intégration, documentation et prise en main du SDK

Plusieurs documents concernant le l'utilisation des Hi5 et l'intégration de ces derniers dans une application Unity ont été rédigés et sont disponibles sur la page de téléchargement du site. Nous nous servirons de ces manuels d'utilisation pour comprendre au mieux la façon dont l'intégration doit être faite. Tout comme les gants haptiques Senso, les Hi5 ne bénéficient pas d'un retour de force mais uniquement d'un retour haptique caractérisé par des vibrations. Nous utiliserons donc principalement le guide *Hi5 Unity Interaction SDK User-Guide v.1.1.0.35* pour permettre aux gants de simuler le toucher avec les objets de notre scène. Parallèlement à la lecture de ce document, divers tests et essais seront créés dans des scènes externes pour éviter les problèmes que nous pourrions rencontrer lors de la tâche suivante.

## — Intégration au projet Unity

Pour finir, nous mettrons en pratique toutes les connaissances accumulées précédemment mais cette fois dans notre application. Tout comme les intégrations précédentes, celle-ci sera mise en place dans une scène propre contenant des objets et boutons interactifs. Le but de cette tâche est de pouvoir utiliser pleinement les Hi5 dans le contexte de notre application Unity. Si l'intégration prend moins de temps que prévu, nous utiliserons le temps restant pour ajouter le système de Vive Tracker aux Hi5.

### 3.5 Gants Avatar VR



FIGURE 3.4 – Gant Avatar VR

#### — Installation SDK / Tests des gants

Les Avatar VR sont livrés avec les SDKs compatibles Unity, Unreal, C++, C# et OSVR. Pour ce projet, nous n'utiliserons que celui pour Unity. Une fois le SDK téléchargé et importé dans notre projet, nous passerons à la phase de test. Cette étape se fera par le biais de l'application *NDSuite* disponible sur le [site du fabricant](#). Elle nous permettra entre autres de tester et comprendre le fonctionnement de ces gants.

#### — Recherche sur l'intégration, documentation et prise en main du SDK

Toute la partie d'immersion autour de ces gants se fera via la documentation officielle disponible à [cette adresse](#). Nous apprendrons notamment à préparer une scène, intégrer les gants à cette dernière et mettre en place les différentes propriétés haptiques telles que la perception d'un objet et sa texture, ou l'effet d'un clic sur un bouton.

#### — Intégration au projet Unity

Une fois l'utilisation du SDK acquise, nous l'intégrerons à notre 4ème scène en utilisant le modèle de main fourni par la société. Les gants possèdent un système de retour tactile et de ressenti de texture. Nous accentuerons donc le développement de ces deux propriétés grâce aux objets et boutons mis en place dans notre scène.

## 3.6 Joystick Falcon



FIGURE 3.5 – Joystick Falcon

### — Installation driver / Tests des joysticks

Contrairement aux différents gants que nous utiliserons pour ce projet, les Falcon ne possèdent pas de SDK mais nécessitent l'installation d'un driver. Ce dernier est disponible sur [cette page](#) et permettra la reconnaissance du matériel par l'ordinateur. Ensuite, nous nous servirons de projets déjà réalisés par le groupe Imagerie ou par Kenneth Bogert sur son dépôt Github pour tester le matériel. Les tests couvriront les principales propriétés des Falcon c'est-à-dire le retour de force et le ressenti du poids de l'objet avec lequel nous interagissons.

### — Recherche sur l'intégration, analyse de projets déjà réalisés

Comme aucune documentation officielle concernant une quelconque intégration des Falcon dans Unity n'est disponible, la phase de recherche se fera essentiellement par le biais de projets déjà créés. Ces projets seront directement repris d'internet ou du groupe Imagerie et serviront d'exemple sur lequel nous approfondirons nos connaissances. Divers tests et approches d'exemples seront développés sous Unity durant cette phase de recherche afin d'éviter les erreurs que nous pourrions rencontrer lors de la prochaine tâche.

### — Intégration au projet Unity

Les Falcons ne possédant pas de SDK, la phase d'intégration à notre projet n'en sera que plus longue. C'est pourquoi cette dernière est planifiée sur huit jours durant lesquels nous mettrons en pratique dans notre dernière scène les différentes propriétés des Falcons en liens avec nos objets. Une grande partie du code concernant l'intégration aura déjà été réalisé et testée durant la tâche précédente afin de minimiser la perte de temps due à la non-documentation du matériel.

## 3.7 Finalisation

### — Menu principal

Une fois tous les dispositifs intégrés et fonctionnels, nous développerons un menu principal permettant la sélection du matériel à utiliser, chacun directement relié à sa propre scène de jeu. Ce menu sera très basique et sera le système permettant de switcher entre les différentes scènes. Un menu pause sera également ajouté permettant de revenir au menu principal, de changer de matériel haptique et ainsi de scène de jeu. Le test de connectivité des gants sera réalisé dans chacune des scènes et non dans le menu.

### — Amélioration globale (tracking, problèmes, ergonomie, etc.)

L'objectif principal du projet étant l'intégration des différents dispositifs haptiques à notre application Unity, nous ne nous focaliserons pas en premier sur les améliorations potentielles. Cependant, une fois le projet fini, nous effectuerons une inspection complète de ce dernier afin de corriger les derniers problèmes, de commenter les classes que nous avons créées, d'améliorer l'ergonomie globale de notre application et, si le temps le permet, d'ajouter le système de tracking par le biais des Vive Tracker dans toutes les scènes exceptée celle des Falcons.

### — Étude comparative des matériels

Finalement, le document de comparaison complet des matériels sera rédigé en dernier. Il permettra au lecteur d'avoir une idée globale sur les caractéristiques, les capacités et le fonctionnement des différents gants et joystick utilisés. Chaque dispositif possèdera une partie caractéristiques / propriétés dont les données seront directement reprises du tableau récapitulatif présenté au chapitre 2.7, et une partie ressenti / résultats / avantages et inconvénients (selon le type d'application) qui sera remplie au fur et à mesure des tests et intégrations du matériel. Ce document sera livré en annexe du mémoire qui, lui, contiendra chaque étape nécessaire à l'intégration des différents dispositifs haptiques afin que n'importe quelle personne puisse refaire les intégrations chez elles ainsi qu'un résumé des résultats obtenus dans l'étude comparative.

## Chapitre 4

# Analyse





## Chapitre 5

# Conception



## Chapitre 6

# Realisation



## Chapitre 7

### Tests



## Chapitre 8

## Conclusion

# Bibliographie

- [1] J. Steuer, “Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence,” *Journal of Communication*, vol. 42, 1992.
- [2] Sensable Technologies Inc., *OpenHaptics Toolkit version 3.0, Programmer’s Guide*, 1999-2008.
- [3] Bouaziz, “La modalité haptique.” [Online]. Available : [http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2004.bouaziz\\_s&part=269948](http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2004.bouaziz_s&part=269948)
- [4] J.-L. Rodríguez, R. Velázquez, C. Del-Valle-Soto, S. Gutiérrez, J. Varona, and J. Enríquez-Zarate, “Active and passive haptic perception of shape : Passive haptics can support navigation,” *Electronics*, vol. 8, 2019.
- [5] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo, “Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand : Taxonomy, Review, and Perspectives,” *Transactions on Haptics*, vol. 10, 2017.
- [6] V. Hayward, O. R. Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant, and G. Robles-De-La-Torre, “Haptic interfaces and devices,” *Sensor Review*, vol. 24, 2004.
- [7] H. Tan, “Perceptual user interfaces : haptic interfaces,” *Communications of the ACM*, vol. 43, 2000.
- [8] Apple Inc., “Take advantage of 3d touch,” 2017. [Online]. Available : <https://developer.apple.com/ios/3d-touch/>
- [9] W. Harris, “How haptic technology works,” 2008. [Online]. Available : <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/haptic-technology.htm>
- [10] H. Culbertson, S. B. Schorr, and A. M. Okamura, “Haptics : The present and future of artificial touch sensation,” *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 1, 2018.
- [11] C. Systems. [Online]. Available : <http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp>
- [12] M. L. Turner, D. H. Gomez, M. R. Tremblay, and M. Cutkosky, “Preliminary tests of an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation,” 2019.
- [13] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian, “The rutgers master ii-new design force-feedback glove,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, 2002.
- [14] B. D. Jyothi and R. V. Krishnaiah, “Haptic technology- a sense of touch,” *International Journal of Science and Research*, vol. 2, 2013.
- [15] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, and A. Israr, “Aireal : Interactive tactile experiences in free air,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 32, 2013.
- [16] ShadowRobot Inc., “Shadow dexterous hand™,” 2017. [Online]. Available : <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>
- [17] NASA, “Robonaut r2,” 2012. [Online]. Available : <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-robonaut-58.html>
- [18] S. M. Flynn, B. S. Lange, S. C. Yeh, and A. A. Rizzo, “Virtual reality rehabilitation – what do users with disabilities want ?” 2008. [Online]. Available : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.486.7897>
- [19] T. Kuhlen and C. Dohle, “Virtual reality for physically disabled people,” *Computers in biology and medicine*, vol. 25, 1995.



- [20] R. Mason and R. Manduchi, "Haptic modeling for the blind using the novint falcon." [Online]. Available : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.211.274>
- [21] K. Gudeman, "Illinois researchers developing new technology to assist in-home rehab care." [Online]. Available : <https://csl.illinois.edu/news/illinois-researchers-developing-new-technology-assist-home-rehab-care>
- [22] R. L. Williams II, M. Srivastava, J. N. Howell, D. C. Conatser, Robert R. and Eland, J. M. Burns, and A. G. Chila, "The virtual haptic back for palpatory training," 2007. [Online]. Available : <https://www.ohio.edu/mechanical-faculty/williams/html/PDF/ICMI04.pdf>
- [23] C. J. Jacobus and J. Lynn Griffin, "Method and system for simulating medical procedures including virtual reality and control method and system for use therein," 1998. [Online]. Available : <https://patentimages.storage.googleapis.com/b4/6a/37/d505c9d6a52d24/US5769640.pdf>
- [24] D. Pinzon, S. Byrns, and B. Zheng, "Prevailing trends in haptic feedback simulation for minimally invasive surgery," *Surgical Innovation*, vol. 23, 2016.
- [25] A. Wade, "Midas touch – the technologies driving the haptics revolution," 2017. [Online]. Available : <https://www.theengineer.co.uk/haptic-technologies-revolution/>
- [26] K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli, "Haptic rendering : Introductory concepts," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, 2004.
- [27] M. Lin and K. Salisbury, "Haptic rendering–beyond visual computing," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, 2004.
- [28] C. Basdogan, S. De, J. Kim, Manivannan Muniyandi, H. Kim, and M. A. Srinivasan, "Haptics in minimally invasive surgical simulation and training," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, 2004.
- [29] Shoon So Oo, N. H. H. Hanif, and I. Elamvazuthi, *Closed-loop force control for haptic simulation : Sensory mode interaction*, 2009.
- [30] J. Perret and E. Vander Poorten, "Touching virtual reality : a review of haptic gloves," 2018.
- [31] N. Ltd., 2019. [Online]. Available : <https://hi5vrglove.com/>
- [32] S. Glove., 2019. [Online]. Available : <https://www.senseglove.com/>
- [33] H. Inc., 2019. [Online]. Available : <https://haptx.com/>
- [34] S. NeuroDigital Technologies, 2019. [Online]. Available : <https://avatarvr.es/>
- [35] S. Martin and N. Hillier, "Characterisation of the novint falcon haptic device for application as a robot manipulator," *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, 2009.
- [36] T. National Science Foundation, R. E. Stamper, and A. L-w. Tsai, "A three degree of freedom parallel manipulator with only translational degrees of freedom," 2000.
- [37] A. V. Shah, S. Teuscher, E. W. McClain, and J. J. Abbott, "How to build an inexpensive 5-dof haptic device using two novint falcons," in *In Haptics : Generating and Perceiving Tangible Sensations*. Springer, 2010.

# Table des figures

1.1	Logo Unity . . . . .	1
2.1	Haptique actif et passif . . . . .	3
2.2	Définition de l'haptique . . . . .	4
2.3	Techologie haptique représentée par une interface . . . . .	5
2.4	Gant CyberGrasp . . . . .	6
2.5	Gant Rutgers Master II . . . . .	6
2.6	Configuration basique des dispositifs haptiques. Casiez, 2004 . . . . .	7
2.7	Système de Vortex pour Disney Aereal . . . . .	8
2.8	La main Shadow C6M Smart Motor devant la main Shadow C3 Dexterous Air Muscle . . . . .	9
2.9	Le Robonaut 2 de la Nasa peut soulever des poids d'environ 9kg . . . . .	9
2.10	Prototype d'un système de réhabilitation basé sur l'haptique . . . . .	10
2.11	L'haptique peut simuler la sensation de différents types de tissus . . . . .	10
2.12	Diagramme de blocs d'un système haptique . . . . .	11
2.13	Gant Hi5 VR Glove (ancien design) . . . . .	12
2.14	Gant SenseGlove . . . . .	12
2.15	Tableau de comparaison entre les CyberGrasp et les Rutgers Master II . . . . .	13
2.16	Gant traditionnel Avatar VR . . . . .	14
2.17	Gant exo-squelettique HaptX . . . . .	15
2.18	Cinématique du Falcon . . . . .	16
2.19	Tableau récapitulatif des différents matériels haptiques . . . . .	17
3.1	Gant SenseGlove . . . . .	20
3.2	Gant Senso . . . . .	21
3.3	Gant Hi5 VR Glove . . . . .	22
3.4	Gant Avatar VR . . . . .	24
3.5	Joystick Falcon . . . . .	25



# Annexes