



HAL
open science

Outils de réalité virtuelle pour la conception universelle

Mathieu Delangle

► **To cite this version:**

Mathieu Delangle. Outils de réalité virtuelle pour la conception universelle. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2016. Français. NNT: . tel-02586813

HAL Id: tel-02586813

<https://hal.science/tel-02586813v1>

Submitted on 18 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

Mathieu DELANGLE

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture

Discipline : Génie mécanique

Unité de recherche : UMR 6597

Outils de réalité virtuelle pour la conception universelle

Soutenue le 4 mai 2016 à l'Ecole Centrale de Nantes

JURY

Président :	Simon RICHIR , Professeur, Arts et Métiers PARISTECH, Angers
Rapporteurs :	Jean-Claude SAGOT , Professeur, UTBM, Belfort Carole BOUCHARD , Professeur, Arts et Métiers PARISTECH, Paris
Examineurs :	Simon RICHIR , Professeur, Arts et Métiers PARISTECH, Angers
Directeur de Thèse :	Jean-François PETIOT , Professeur, École Centrale de Nantes, IRCCyN, Nantes
Co-encadrante de Thèse :	Émilie POIRSON , Maître de conférences, École Centrale de Nantes, IRCCyN, Nantes

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de thèse, Jean-François Petiot, qui a accepté de me guider tout au long de mes travaux de recherche. Merci à mon encadrante, Émilie Poirson, pour m'avoir accompagné durant ces trois ans, et m'avoir permis de travailler sur ce sujet si passionnant.

Merci à Jean-Claude Sagot, Carole Bouchard, et Simon Richir, d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse en tant que rapporteurs et examinateur.

Merci à tous les membres de l'École Centrale de Nantes et du laboratoire l'IRCCyN, avec lesquels j'ai pu collaborer durant ces trois ans de thèse. Merci à Jean-François, Catherine, Matthieu, Olivier, Rafael, Florent... et à toute l'équipe du bâtiment Productique. Merci également à Mohammed pour sa sympathie, sa bonne humeur, et ses interventions d'urgence en salle de réalité virtuelle. Remerciements aussi pour Loup, Sophie et Jérémy pour m'avoir donné un coup de main lorsque c'était nécessaire.

Ensuite, je tiens à remercier Jacky, Maël (« Boujou beko » à eux), mes colocataires, et amis de tous bords, pour leur soutien durant ces trois années, et pour encore de nombreuses autres j'espère. Merci aussi à Véronique pour sa présence et sa patience (ainsi que pour ses corrections toujours très pertinentes...).

Enfin, un merci infini à ma famille et à mes parents, à qui je dois beaucoup, si ce n'est tout. Merci à eux d'avoir toujours cru en moi, et d'avoir toujours tout fait pour me permettre de réussir dans mes projets, et dans ma vie personnelle et professionnelle.

À mes parents...

Sommaire

Introduction	11
---------------------	-----------

Chapitre I : Etat de l'art scientifique et problématique de recherche

1 Conception centrée utilisateur et conception <i>pour tous</i>	16
1.1 Conception de produits centrée sur l'utilisateur	16
1.2 Conception de produits « pour tous »	24
1.3 Limitation des représentations numériques dans une démarche de conception centrée-utilisateur et <i>pour tous</i>	33
1.4 Vers une optimisation du concept numérique.....	35
2 La réalité virtuelle en conception de produit centrée sur l'homme	36
2.1 Définition de la réalité virtuelle.....	36
2.2 Concepts d'interaction et d'immersion.....	37
2.3 Interfaces comportementales	39
2.4 La réalité virtuelle en conception de produits centrée sur l'utilisateur.....	42
2.5 La réalité virtuelle et la prise en compte du handicap.....	45
2.6 Limitations des approches existantes dans une démarche universelle	46
2.7 Conclusion	48
3 Problématique de recherche	49
4 Positionnement	50

Chapitre II : Outils de réalité virtuelle pour l'évaluation ergonomique de produits: étude d'une tâche d'atteinte

5 Etude comparative expérimentale	54
5.1 Introduction.....	54
5.2 Matériels et méthodes	55
5.3 Application expérimentale	59
5.4 Résultats	63
5.5 Discussion	71
5.6 Conclusion	74

Chapitre III : Création d'un dispositif de réalité virtuelle pour la conception universelle

6	Création du dispositif de réalité virtuelle	78
6.1	Introduction.....	78
6.2	Création de l'infrastructure	79
6.3	Création d'un mannequin virtuel paramétrable	82
6.4	Résultats obtenus	90
6.5	Intégration des données physiques spécifiques	95
6.6	Interface utilisateur	105
6.7	Conclusion	108

Chapitre IV : Application du dispositif développé

7	Application à l'évaluation ergonomique	112
7.1	Introduction.....	112
7.2	Expérimentation 1 : étude qualitative et quantitative de l'usage en RV	112
7.3	Optimisation de l'évaluation du couple produit/usage en RV	122
7.4	Outil complémentaire d'analyse des déficiences et de l'usage	125
7.5	Evaluation qualitative du dispositif développé	131
7.6	Perspectives d'applications	133
7.7	Conclusion	135
8	Dispositif de réalité virtuelle dans une approche de conception inclusive	138
8.1	Apports du dispositif	138
8.2	Prise en compte structurée de la variabilité humaine	141
8.3	Discussion	145
8.4	Conclusion	146

Conclusion et perspectives	149
-----------------------------------	------------

Bibliographie	153
----------------------	------------

Annexes	167
----------------	------------

Introduction

-« *La nature crée des différences, la société en fait des inégalités* »-

-Tahar Ben Jelloun-

De nos jours encore, de nombreuses personnes ne peuvent participer sur un pied d'égalité aux activités socioprofessionnelles de la vie quotidienne, simplement parce que la société et l'environnement ne sont pas conçus pour répondre de manière satisfaisante à leurs besoins. En première ligne de ce problème, les personnes en situation de handicap et à mobilité réduite en général. Nous sommes cependant tous concernés par cette question. Que ce soit de façon temporaire (fracture d'un membre par exemple) ou permanente (déficiences physiques liées à l'âge par exemple), bon nombre d'entre nous présentent, ou présenteront des difficultés à interagir avec notre environnement, à un instant de notre vie. Il est ainsi essentiel que les produits qui nous entourent, et avec lesquels nous interagissons, puissent répondre le mieux possible aux différents besoins, attentes, et caractéristiques de nous tous, utilisateurs.

Depuis plusieurs années, de nombreux travaux se sont développés autour de conceptions dites *universelles, pour tous* ou encore *inclusives* (Story et al. 1998; Clarkson et al. 2013). Ces différentes terminologies font référence à un état d'esprit commun, visant à concevoir des produits et environnements dont l'usage est destiné à tous, dans la plus large mesure, sans besoin d'adaptation ou de conception particulière. L'objectif d'une telle démarche est de prendre en compte les besoins de tous, y compris des personnes en situation de handicap, sans chercher de conception dite "spécifique", pouvant stigmatiser ou marginaliser certains utilisateurs. Il devient ainsi essentiel de considérer la diversité humaine existante parmi les utilisateurs, couvrant aussi bien les variations de capacités (motrices, sensorielles, cognitives), de caractéristiques anthropométriques (stature, poids, etc.), d'envies, de préférences ou encore d'aspirations.

Dans ce contexte, les acteurs de la conception (ergonomes, designers, etc.) doivent pouvoir disposer de supports techniques et méthodologiques, leurs permettant de comprendre et d'intégrer cette diversité, et ce au plus tôt du processus de conception. Ils peuvent ainsi prendre les décisions de conception les mieux adaptées aux attentes des utilisateurs, et de ce fait définir les caractéristiques du produit à concevoir, ainsi que l'usage associé. En effet, de nombreux travaux insistent sur la nécessité de concevoir conjointement le produit et son usage, c.à.d. la relation entre le produit et l'utilisateur (Sagot et al. 2005). La conception de produits nouveaux (ou en cours de conception) implique ainsi d'intégrer les caractéristiques des utilisateurs, pour imaginer, simuler et anticiper l'usage futur du produit, et ainsi définir l'activité future adéquate. Cependant, la variabilité humaine ainsi que les spécificités des capacités d'un certain nombre d'utilisateurs (personnes en situation de

handicap, personnes âgées, etc.), entraînent nécessairement des difficultés accrues pour définir l'activité future souhaitable, et donc les caractéristiques du produit.

De nombreux travaux soulignent aujourd'hui l'intérêt des simulations numériques pour soutenir l'intégration du facteur humain dans le processus de conception centrée-utilisateurs (Chaffin 2007; Hogberg 2009). Les mannequins numériques peuvent en effet permettre, dans une certaine mesure, de modéliser les caractéristiques anthropométriques et comportementales (postures, gestes) des utilisateurs (Marshall et al. 2004; Lämkkull et al. 2009). Le sujet et le produit sont virtuellement représentés, soutenant les concepteurs dans l'évaluation des solutions de conception. Depuis quelques années, la **réalité virtuelle** (RV) semble également être envisagée comme un outil efficace pour supporter le processus d'évaluation et de conception de produits centrée sur l'utilisateur (interactivité entre l'homme et le système, évaluation collaborative, etc.) (Chedmail et al. 2002; Burkhardt 2003). La réalité virtuelle permet en effet d'entraîner une personne dans une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, et pouvant simuler certains aspects du monde réel (Fuchs & Moreau 2003). Ces propriétés de simulations virtuelles et interactives peuvent ainsi permettre aux acteurs de la conception de mieux modéliser et évaluer le produit en cours de conception, ainsi que son usage.

Dans ce contexte, nous proposons de nous intéresser à l'utilisation des outils de réalité virtuelle pour l'intégration du facteur humain dans le processus de conception. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous concentrons notamment sur le contexte spécifique de la conception universelle. Ainsi, nous proposons au travers de ces travaux de recherche d'étudier et d'explorer comment la réalité virtuelle peut-elle être utilisée pour soutenir la conception de produits devant répondre aux besoins d'utilisateurs ayant des caractéristiques physiques spécifiques.

Structure du manuscrit

Étant donnée la pluridisciplinarité de nos travaux de recherche, nous proposons de commencer notre mémoire par un **état de l'art** en deux parties, présentant les grands axes constituant nos travaux de recherche. La première partie traite des approches de conception de produits centrés sur l'utilisateur et de produits « universels ». Nous nous concentrerons particulièrement sur la prise en compte et l'intégration du facteur humain dans le processus de conception, notamment au travers des mannequins et simulations numériques. Nous étudierons les apports de ces outils en tant que représentation intermédiaire de conception, ainsi que leurs limites, concernant notamment la simulation de l'activité et des caractéristiques des utilisateurs. Ensuite, dans une seconde partie, nous introduirons le domaine de la réalité virtuelle, et ses applications en tant que soutien du processus de conception centré-utilisateur et universel. Après avoir présenté les concepts majeurs et outils associés à cette discipline, nous nous concentrerons sur les apports et limitations des approches existantes dans la modélisation et la prise en compte du facteur humain, et notamment dans le cadre d'utilisateurs en situation de handicap, de personnes âgées, et des personnes à besoins spécifiques en règle générale.

Au vu des constats réalisés dans l'état de l'art, nous définissons ensuite notre **problématique et approche de recherche**. Nous proposons ainsi une approche méthodologique fondée sur l'utilisation conjointe des mannequins numériques et de la réalité virtuelle (RV), dans le but de mieux intégrer le

facteur humain dans le processus de conception. Notre vision est d'améliorer la place du concepteur en tant qu'acteur actif, et représentatif des caractéristiques physiques et comportementales des utilisateurs finaux.

Le **Chapitre II** propose l'**application pratique de notre approche** au travers d'une **étude préliminaire** traitant de l'analyse ergonomique d'une tâche d'atteinte. Cette étude est basée sur la comparaison des résultats (comportements d'atteintes) obtenus par le biais de différentes approches : une étude expérimentale impliquant un panel réel d'utilisateurs, une évaluation par mannequins numériques, et enfin une application de l'approche proposée. Nous étudions ainsi les apports de notre approche et des interfaces de réalité virtuelle utilisées, dans la prise en compte des caractéristiques (anthropométriques et comportementales) des utilisateurs futurs. Nous présentons également certaines remarques et limitations soulevées, concernant notamment l'intégration du facteur humain dans une optique de conception *pour tous*.

Le **Chapitre III** est consacré au **développement d'un dispositif de réalité virtuelle**, visant à répondre aux limitations soulevées précédemment. L'objectif est de permettre aux concepteurs de mieux modéliser l'activité des utilisateurs ayant des besoins spécifiques, ainsi que l'usage associé du futur produit. Pour cela, nous proposons une approche originale, basée sur l'utilisation d'un moteur de rendu 3D temps réel, classiquement utilisé pour la création de jeux vidéo. Premièrement, un mannequin paramétrable est développé pour soutenir la modélisation des caractéristiques anthropométriques spécifiques des utilisateurs futurs. Une interface est ensuite créée, permettant d'aider les concepteurs à prendre en compte les capacités et comportements spécifiques des utilisateurs.

Le **Chapitre IV** présente l'**application du dispositif développé** dans un contexte expérimental. Nous étudions les apports de celui-ci dans le processus de conception, notamment lors des phases d'évaluation immersive du concept virtuel. Nous proposons également le développement d'outils et fonctionnalités permettant de mieux soutenir les concepteurs dans l'évaluation du couple produit/usage, et dans la prise en compte de l'impact des capacités physiques spécifiques sur l'activité du sujet (stratégies d'adaptations mises en jeu par l'utilisateur). Dans une seconde partie, nous discutons de la contribution des travaux effectués dans une démarche de conception *universelle*. Dans ce cadre, nous présentons une approche permettant de structurer l'intégration du facteur humain dans le processus de conception inclusive.

La conclusion générale permet de **discuter et conclure sur la contribution générale de nos travaux** de thèse, relativement au domaine d'étude et la problématique de recherche traitée.

Chapitre I

Etat de l'art scientifique et problématique de recherche

1 Conception centrée utilisateur et conception *pour tous*

1.1 Conception de produits centrée sur l'utilisateur

1.1.1 Introduction

L'enjeu majeur de l'entreprise industrielle d'aujourd'hui est de s'adapter aux attentes des clients et à leurs évolutions, par une offre de produits respectant la triade « qualité-coût-délais » (Sagot 1996; Grosjean & Neboit 2000; Perrin 2001). En effet, l'économie actuelle se caractérise par une forte concurrence et une très faible croissance, obligeant les entreprises à concevoir plus vite, des produits moins chers, avec une qualité toujours croissante. Ce contexte économique contraint souvent les concepteurs à définir des priorités vis-à-vis des fonctions à assurer par le produit. Ces fonctionnalités, de plus en plus nombreuses et complexes, conduisent à définir des produits pouvant donner entière satisfaction d'un point de vue technique, mais posant de nombreux problèmes en termes d'utilisation et d'exploitation (Brocas 1997; Thomas & Macredie 2002; Brangier & Barcenilla 2003; Goodman et al. 2006). En effet, une telle démarche de conception engendre trop souvent des produits mal adaptés aux caractéristiques humaines (capacités physiques, capacités cognitives, dimensions corporelles, force musculaire, etc.) (Sagot 1996), entraînant parfois un rejet de la part des utilisateurs.

Ce constat est applicable aux produits de grandes consommations comme aux produits industriels, pouvant notamment être concernés par des problèmes d'adaptation liés à l'activité physique des opérateurs (gestes, postures, efforts, etc.). A titre d'exemple, les dimensions de certains postes de travail industriels obligent souvent les opérateurs à adopter des postures contraignantes (hors normes de sécurité et de confort) (Bellemare et al. 2001; St-Vincent et al. 2000). Les problèmes relevés s'expliquent souvent par un déséquilibre entre les sollicitations physiques et mentales de l'utilisateur, et ses capacités fonctionnelles en termes biomécaniques, de perception cognitive, etc.

Cette inadaptation du produit peut avoir des effets négatifs à la fois sur les utilisateurs en termes de confort, de santé, et de sécurité, mais aussi pour les entreprises en termes de coût. Ainsi, concevoir un produit satisfaisant techniquement ne suffit plus. Les entreprises doivent désormais adopter une démarche innovante permettant de concevoir des systèmes répondants aux attentes des utilisateurs finaux (Sagot 1999; Norman 2013). Une meilleure intégration du **facteur humain** lors du processus de conception est ainsi nécessaire. On passe alors d'une démarche de conception technocentrée (centrée sur le produit), à une démarche anthropocentrée (centrée sur l'utilisateur).

1.1.2 Approche normative de la conception centrée sur l'utilisateur

La conception centrée-utilisateur est une approche considérant la connaissance des utilisateurs comme une préoccupation centrale (Stone et al. 2005). L'utilisateur final, avec ses besoins et ses attentes, est placé au centre des préoccupations des concepteurs, et donc au cœur du processus de conception (Maguire 2001). Ce modèle s'appuie sur une analyse des usages en contexte, en vue de «comprendre et spécifier le contexte d'utilisation» (Nelson 2011). D'un point de vue normatif (norme

internationale ISO 9241-210), elle est définie par une démarche de conception itérative basée sur quatre grands principes (ISO 2010) (Figure 1-1) :

- **comprendre et spécifier le contexte d'utilisation** au travers de l'analyse des caractéristiques des utilisateurs potentiels (e.g., compétences) et de leurs profils, d'une formalisation des tâches que l'utilisateur devra réaliser avec le système et d'une analyse de l'environnement dans lequel le système sera intégré.,
- **spécifier les exigences liées à l'utilisateur et à l'organisation** au travers d'une analyse fonctionnelle prenant notamment en compte les aspects techniques et les contraintes liées à l'utilisateur (e.g. charge de travail),
- **proposer des solutions de conception** comme par exemple des maquettes ou prototypes, sur la base des aspects techniques et des connaissances sur les utilisateurs,
- **évaluer les conceptions par rapport aux exigences** (caractéristiques et besoins des utilisateurs).

Les deux premières activités constituent la phase d'analyse, suivie de la phase de conception et de la phase d'évaluation. La **phase d'analyse** a pour objectif d'identifier le contexte d'utilisation, c.à.d. la population cible (professionnels ou particuliers, enfants ou adultes, etc.), les tâches confiées à ces derniers ou encore l'environnement dans lequel le produit sera utilisé. Cette phase est traditionnellement réalisée par le biais de questionnaires, de grilles d'observation ou encore par l'animation de focus group (groupes d'utilisateurs). La **phase de conception** consiste en la création de story-boards, maquettes ou prototypes plus ou moins fonctionnels du futur produit, tenant compte à la fois des exigences définies dans la première phase mais également des échanges avec les utilisateurs et des **connaissances pluridisciplinaires** de l'équipe de conception (Leborgne 2001). La **phase d'évaluation** permet de valider ou d'infirmer les choix de conception en étudiant l'utilisabilité du produit par rapport aux exigences définies lors de la phase d'analyse. L'approche itérative permet de tester les solutions de conception au plus tôt du processus de conception afin de les améliorer tout au long de celui-ci.

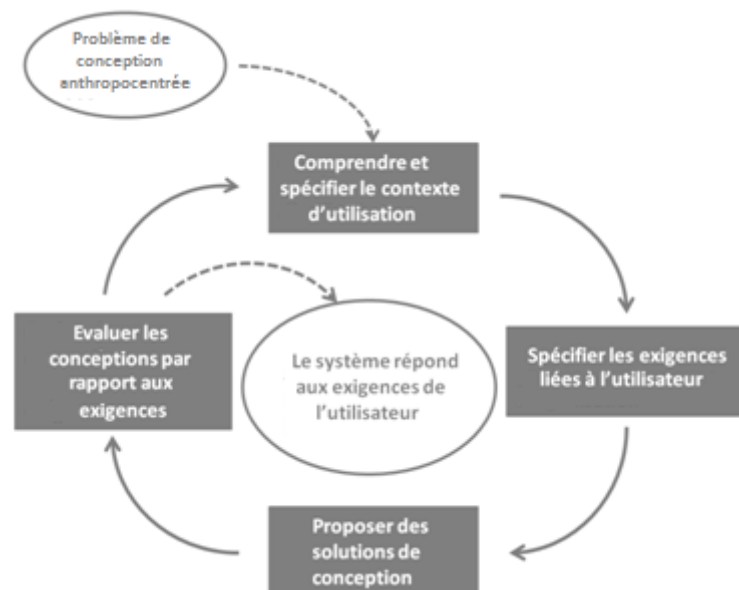


Figure 1-1. Modèle de référence du processus de conception centrée-utilisateur : boucle itérative basée sur les quatre activités de conception (adaptée de la norme ISO 13407).

Cette approche de conception dépend donc de la collaboration de nombreux domaines (marketing, communication, design, etc.), dont celui de l'**ergonomie**. Bien que dépendant de nombreux champs disciplinaires, l'intégration des caractéristiques des utilisateurs finaux dans la conception est en partie réalisée par le biais de l'ergonomie, jouant un rôle clé dans l'identification des attentes et des besoins des usagers. La démarche de conception centrée sur l'homme est donc avant tout une réponse au besoin d'une meilleure intégration du **facteur humain** au cœur du processus de conception (Brangier & Barcenilla 2003).

1.1.3 Prendre en compte le facteur humain par l'ergonomie

Comme présenté précédemment, l'ergonomie est l'un des champs disciplinaires permettant d'intégrer les caractéristiques des utilisateurs dans le processus. L'ergonomie ou "**l'étude des facteurs humains**" est défini par l'International Ergonomics Association (IEA) comme étant :

"la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les êtres humains et les autres composants d'un système, et la profession qui applique des principes théoriques, données et méthodes en vue d'optimiser le bien-être des personnes et la performance globale des systèmes".

Les ergonomes contribuent dans cette optique à la conception et l'évaluation des tâches, des produits, et des environnements en vue de les **rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limites des personnes**. L'ergonomie peut être vue à la fois comme un corpus de connaissance et comme une méthodologie.

Selon l'IEA, le domaine de l'ergonomie peut être divisé en trois disciplines, regroupant trois types de problématiques. Premièrement, on trouve l'**ergonomie physique**, qui s'intéresse aux caractéristiques anatomiques, anthropométriques, physiologiques et biomécaniques de l'être humain ou d'une certaine population dans leur relation avec l'activité physique. On étudie par exemple l'adaptation d'un produit aux caractéristiques physiologiques d'un panel d'utilisateurs (Poirson & Parkinson 2014). Ensuite, on retrouve l'**ergonomie cognitive**, qui s'intéresse aux processus mentaux, tels que la perception (Petiot & Yannou (2004) par exemple), la mémoire, le raisonnement et les réponses motrices, dans leurs effets sur les interactions entre les personnes et d'autres composantes d'un système. Enfin, on a l'**ergonomie organisationnelle**, qui s'intéresse à l'optimisation des systèmes socio-techniques (structure organisationnelle, règles, processus, etc.).

Ces champs s'appuient sur deux courants ergonomiques qui coexistent, mais diffèrent sur la position de l'Homme vis-à-vis du système (Leborgne 2001). Le premier, d'influence anglophone, adopte une approche essentiellement normative, permettant par exemple d'évaluer les contraintes biomécaniques et énergétiques (Woodson et al. 1992). Le second courant, d'influence francophone, est davantage basé sur l'étude de l'**activité de l'utilisateur** dans son environnement, et de l'interaction entre l'homme et le produit. Dans ce cas, le diagnostic repose alors principalement sur l'observation de l'activité en situation réelle d'utilisation. Cette approche positionne ainsi l'**utilisateur** comme un **acteur du système** (Béguin 2004).

D'une manière générique, de nombreux auteurs s'accordent aujourd'hui sur une telle vision de l'ergonomie dite "de l'activité humaine", et sur la position centrale de l'utilisateur dans le processus

de conception, de façon à **concevoir conjointement le produit et son usage** (Duchamp 1999; Sagot et al. 2003; Chitescu 2005; Mahdjoub 2007; Bennes 2013). L'usage est défini selon Brangier & Barcenilla (2003) comme "la mise en activité effective d'un objet dans un contexte social". Il définit l'activité réelle, c.à.d. la relation entre un objet, un produit et une personne, dans un environnement (physique et social) et un contexte temporel, dans le but de satisfaire un objectif (fonctionnel ou émotionnel). Cet usage peut également faire référence à la pratique sociale, aux coutumes, aux habitudes, etc. Dans nos travaux de recherche, nous nous intéressons à la fonction d'usage du produit au travers de l'ergonomie physique, et particulièrement de l'activité réelle du futur utilisateur dans son environnement.

La place de l'ergonomie et son champ d'application au sein du processus de conception peut être définie par deux approches. La première, l'**ergonomie de correction**, est appliquée pour apporter des modifications au produit existant. Ceci est effectué dans des limites souvent très étroites, pour contrecarrer des problèmes relevant de la sécurité, de la santé ou du confort (Sagot et al. 2005). A contrario, l'ergonomie de conception intervient au moment où s'élabore le système (Falzon 2004). Elle commence ainsi dès les premières phases de la conception, au niveau de l'analyse des besoins, et se poursuit tout au long du processus, permettant une plus grande efficacité de l'action de conception. Cette seconde démarche, plus préventive, est parfois confrontée à ce qui est appelé « **le paradoxe de l'ergonomie de conception** » (Theureau & Pinsky 1984). En effet, comme précisé précédemment, l'approche francophone de l'ergonomie est basée sur l'observation de l'activité réelle de l'utilisateur dans son environnement. Or, dans le cas de conception de nouveaux produits (ou plus exactement « produits nouveaux » (Duchamp 1988)), cette activité définie par l'interaction Homme-Produit, n'est pas observable, car le produit est encore inexistant. Pour lever ce paradoxe, il est ainsi nécessaire de permettre aux concepteurs de construire une situation dans laquelle les utilisateurs développeront une **activité la plus proche possible de la situation future**, et de se baser sur cette situation de référence pour effectuer les observations et construire un diagnostic (Leborgne 2001). Certains auteurs ont mis en avant l'intérêt des représentations et simulations numériques, notamment dans les phases amont du processus, pour guider la conception de produits totalement nouveaux, et ainsi résoudre ce paradoxe (Chitescu 2005). Nous développerons ce point plus tard dans la suite du manuscrit.

L'ergonomie, qu'elle soit physique ou cognitive, de correction ou de conception, permet donc une prise en compte du facteur humain, dans le but de concevoir des produits répondant aux attentes et besoins des futurs utilisateurs. Nous proposons maintenant d'exposer la place de l'ergonomie dans la conception, et son intégration dans le processus, au travers notamment du métier d'ergonome.

1.1.4 L'ergonomie dans le processus de conception

Approches de conception de produit

L'approche traditionnelle de conception de produit est caractérisée par des activités s'effectuant de manière **séquentielle** (Quarante 1994). L'organisation des acteurs est dictée par les différentes étapes du cycle de vie du produit à concevoir : étude de faisabilité (spécification), étude préliminaire (conception générale), étude détaillée (conception détaillée), réalisation (fabrication), et post-conception (utilisation, évaluation, extinction).

L'approche séquentielle classique correspond à une vision de conception où chaque métier est cloisonné et où l'acteur N+1 a une tâche bien déterminée qu'il commence lorsque l'acteur N a terminé, et ainsi de suite. Depuis plusieurs années, des changements organisationnels de la conception ont permis l'émergence de nouvelles approches permettant de passer d'un processus séquentiel traditionnel, à des processus dits concourants, simultanés, collaboratifs ou encore intégrés (Sohlenius 1992; Gomes 1999; Bocquet 1998). Ces approches sont basées sur la coordination, l'anticipation, et l'intégration des différents métiers, dès les premières phases du processus de conception. Le processus devient alors de plus en plus pluridisciplinaire, car de nouveaux acteurs, qui intervenaient jusque-là dans les phases aval, sont aujourd'hui sollicités en amont du processus, et encouragés à exprimer au plus tôt leur point de vue (Béguin 2004).

Ainsi, la conception de produits est aujourd'hui vue par de nombreux auteurs comme une discipline transversale et multi-métiers, dans laquelle la maîtrise des points de rencontre avec des disciplines métiers carrefours est indispensable (Duchamp 1999; Perrin 2001). De nombreuses disciplines telles que le design, le marketing, la qualité, la fiabilité ou encore **l'ergonomie** s'insèrent ainsi dans le processus de conception de produit. De ce fait, ce type d'approche de conception peut être reconnu aujourd'hui comme favorisant l'intégration de l'ergonomie et donc du facteur humain (Sagot 1999).

Intégration de l'ergonomie

Dans une approche classique, l'ergonome est accompagnateur de la conception (Garrigou et al. 2001), et tient principalement un rôle **d'observateur**, s'intéressant à l'observation et à l'analyse des activités de conception. L'ergonome est sollicité ponctuellement, par exemple lors d'études préliminaires pour analyser des situations existantes et définir les besoins liés au produit (Roussel, 1996; Duchamp, 1999). Cependant, certains travaux, basés notamment sur des modèles d'ingénierie concourante, permettent de favoriser une meilleure intégration de l'ergonome (et la prise en compte du facteur humain) dans le processus de conception. L'ergonome est alors considéré comme un **acteur** au sein du processus de conception (Fadier 1997; Sagot et al. 2003; Quarante 1994; Duchamp 1999), et mute d'un rôle d'observateur à celui de **co-concepteur** (Sagot 1999; Béguin 2004).

L'approche présentée dans ces travaux propose ainsi une meilleure articulation du couple « ergonomie-conception », et ce tout au long du processus (Chitescu et al. 2003). La méthodologie représentée Figure 1-2 est basée sur une approche systématique (Gomes 1999) permettant de décrire le système global « Homme-Produit-Environnement » à différents états (réel et virtuel) et durant les différentes phases du processus de conception (études de faisabilité, études préliminaires, études détaillées, et réalisation).

La traduction des recommandations ergonomiques est ainsi favorisée et conditionnée par l'utilisation et l'évolution **d'Objets Intermédiaires de Conception (OIC)**. Les travaux de Chitescu permettent ainsi de définir un processus de conception centré sur l'homme, basé sur des représentations numériques de ces OIC, et particulièrement sur l'intégration de **simulations par mannequins numériques**. Cette démarche répond à deux besoins : la participation active de l'ergonome à la matérialisation des recommandations ergonomiques du cahier des charges en des principes de solutions ; la possibilité pour les concepteurs d'évaluer ergonomiquement les solutions proposées.

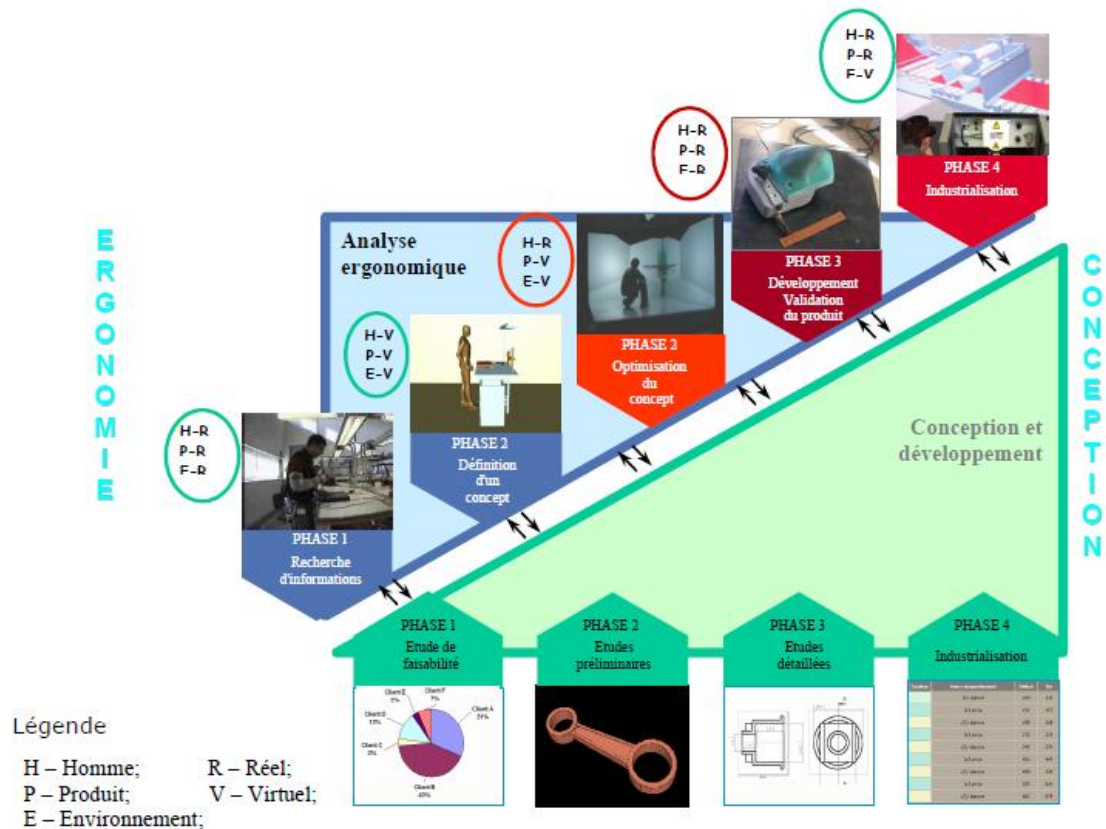


Figure 1-2. Méthodologie de conception centrée sur l'homme traduisant l'articulation «ergonomie-conception » au travers d'un système global « Homme-Produit-Environnement » (Chitescu 2005).

Nous proposons de spécifier plus précisément ce concept d'objet intermédiaire, et de présenter leurs apports dans l'intégration du facteur humain, et spécifiquement au-travers des représentations par mannequin numérique.

1.1.5 Les simulations numériques comme support d'intégration du facteur humain

Les objets intermédiaires (OIC) pour intégrer l'ergonomie dans la conception

Afin d'optimiser la collaboration entre les différents experts métiers et ainsi l'intégration du facteur humain dans la conception de produits, les concepteurs ont besoin de représentations communes ; ce sont les objets intermédiaires de conception. Pour Boujut & Laureillard (2002), cette notion d'objet intermédiaire englobe tous les artefacts physiques (croquis, maquettes, dessins, etc.) ou virtuels (modèles CAO, prototypes virtuels, etc.) générés par les acteurs au cours du processus de conception de produits, qui représentent une partie ou la totalité du produit en cours de conception. Ils servent à la fois de supports de communications, d'outils de médiation entre les différents acteurs de la conception, ainsi que d'artefacts de représentation du futur produit (Boujut & Blanco 2003). Les OIC vont donc permettre la création d'un langage commun à tous les acteurs de la conception, entraînant une meilleure communication entre eux au plus tôt du processus de conception (Brandt 2007).

Les mannequins numériques comme OIC

Les mannequins et environnements numériques peuvent être considérés comme des OIC, permettant de tester différents aspects du produit avant même qu'il n'ait de représentation physique (Chitescu et al. 2003). Ces représentations en 3D servent aussi bien de support aux représentations mentales des concepteurs, qu'à la verbalisation des différentes configurations du concept. L'utilisation des mannequins numériques est souvent considérée comme une des solutions les plus adéquates pour simuler l'activité future possible ou souhaitable (Sagot et al. 2003) de l'utilisateur, et donc la **fonction d'usage** des produits (Chedmail et al. 2002).

En effet, en plus d'une représentation du produit futur en 3D, ces outils peuvent permettre de faciliter la simulation de l'interaction entre le sujet et l'environnement, et donc l'évaluation du produit étudié (Hogberg 2009). Bon nombre de mannequins numériques intègrent des outils d'analyse ergonomique, permettant d'évaluer par exemple l'accessibilité, le volume d'atteinte, la visibilité, ou les contraintes biomécaniques liées aux postures adoptées (risques de troubles, fatigue, etc.). Chitescu (2005) souligne ainsi la contribution des mannequins numériques à une meilleure intégration de l'ergonomie dans la conception de postes de travail, à travers la simulation numérique des activités gestuelles et posturales des futurs utilisateurs. Ils sont intégrés lors des études préliminaires, permettant de définir des principes de solutions. Le système « Homme-Produit-Environnement » représenté Figure 1-2 est alors complètement virtuel.

Ces outils peuvent contribuer à réduire le nombre de tests physiques dans les processus de développement, et faciliter les examens ergonomiques de prototypes virtuels au plus tôt du processus (Chitescu et al. 2003). Ils sont désormais largement utilisés dans de nombreux domaines industriels, comme l'aéronautique ou l'automobile (Pinto & Taneja 2005; Chaffin 2005; Hanson & Högberg 2008; Hanson et al. 2011; Lämkuill et al. 2007; Reed et al. 2003). La Figure 1-3 représente un exemple de l'utilisation d'un mannequin numérique (RAMSIS) pour l'étude de tâches d'assemblage dans un contexte industriel (chaîne de production automobile) (Lämkuill et al. 2009).

De nombreux logiciels de simulation numérique proposent ce type de représentations anthropométriques et d'évaluations ergonomiques virtuelles. Sans présenter une liste exhaustive, nous pouvons par exemple citer les logiciels JACK (Raschke 2004; Blanchonette 2009), RAMSIS (Seidl 1997; Van Der Meulen & Seidl 2007), SAMMIE (Case et al. 1990; Porter et al. 2004), ANYBODY (Rasmussen et al. 2003) ou encore SANTOS (Abdel-Malek et al. 2007).

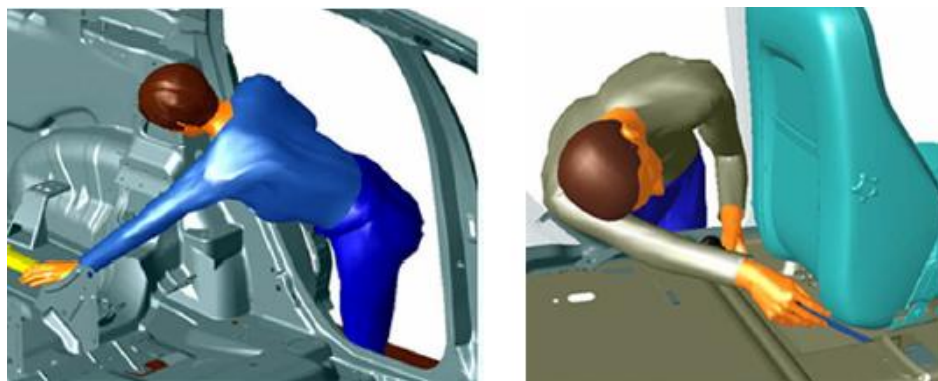


Figure 1-3. Mannequin numérique RAMSIS pour des tâches d'assemblage pour l'automobile (Lämkuill et al. 2009).

A noter que de nombreux logiciels de modélisation humaine proposent également des représentations de mannequins virtuels "anthropomorphes". Contrairement aux mannequins numériques présentés ci-avant, ceux-ci ne sont pas construits sur la base d'une structure morphologique permettant une définition anthropométrique des membres. Ils sont généralement définis sous le nom d'avatar et permettent une représentation physique très "réaliste". Nous pouvons par exemple citer les logiciels MakeHuman, Quidam, ou encore Poser. Bien que n'étant pas initialement développés dans un but ergonomique, ces mannequins peuvent tout de même servir d'outils de représentation et de communication en conception de produit.

1.1.6 Bilan des apports des mannequins et simulations numériques en conception centrée sur l'homme

Les travaux présentés soulignent donc une meilleure prise en compte des caractéristiques de l'humain (utilisateur), due à la représentation numérique en 3D du problème. Ces outils fournissent un support efficace pour intégrer le facteur humain lors des phases amont du processus de conception, notamment à travers la simulation numérique des activités gestuelles et posturales de l'utilisateur (Chitescu 2005). Ils permettent de tester, optimiser et valider les concepts numériques retenus par les concepteurs, et de mieux appréhender les situations dans lesquelles les utilisateurs vont se trouver (Sagot et al. 2005). Ces simulations sont propices à l'établissement d'un processus de conception, et permettent une forte réactivité face aux nombreux changements apportés en phase de conception (facilité de modification d'un modèle numérique par rapport à un prototype physique). Ces représentations fournissent un support de coordination et de collaboration entre les acteurs métiers, et permettent de bien partager les informations, en respectant la vision produit de chacun.

1.1.7 Vers une prise en compte des déficiences physiques des utilisateurs

Les entreprises ont généralement tendance à concevoir les produits pour un utilisateur "idéal" qui ne souffre d'aucune déficience, limitation d'activité ou restriction de participation (Wisner 1995; Sagot 1999). Les méthodes traditionnelles de conception centrée-utilisateur ne permettent pas (ou peu) la prise en compte des personnes déficientes (Bodker 1989; Newell 1993; Gregor et al. 2005).

Dans une démarche de conception centrée sur l'utilisateur, il paraît essentiel de prendre en compte les différentes caractéristiques et aptitudes des sujets pour lesquels le produit doit être développé (Newell & Gregor 1999). C'est pourquoi, de plus en plus d'approches anthropocentrées se concentrent sur l'intégration des personnes présentant des limitations physiques (personnes âgées, personnes en situation de handicap, etc.) dans le processus de conception. On peut parler par exemple de « barrier-free design », « design for disability », « rehabilitation design », « accessible design », « design for all », « inclusive design », « user-sensitive design », « inclusive design », ou bien encore de « universal design » (Erlandson 2007; Newell et al. 2011; Conte 2004; Clarkson et al. 2013).

Dans la suite du document, nous allons nous intéresser à l'intégration et la prise en compte par les concepteurs des capacités physiques spécifiques en conception de produit. Nous proposons de placer notre approche dans une démarche de conception dite « pour tous » ou « **universelle** ». Nous nous intéresserons notamment à l'utilisation des modèles numériques dans **l'intégration et la simulation des handicaps et déficiences**.

1.2 Conception de produits « pour tous »

1.2.1 Introduction

La prise en compte du handicap dans la conception de produit est un problème essentiel à prendre en compte, que ce soit d'un point de vue social, économique, ou éthique.

Avec le vieillissement de la population, les personnes âgées et les personnes avec handicap moteur faisant partie d'une réelle minorité jadis, sont aujourd'hui partie intégrante de la société. D'après l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques), en 2050, un français sur trois serait âgé de 60 ans ou plus, contre un sur cinq en 2005. Et cette tendance de vieillissement de la population est présente au niveau mondial. L'allongement de la durée de vie allant de pair avec une augmentation des maladies chroniques, les limitations fonctionnelles sont de plus en plus fréquentes et multidimensionnelles, associant des problèmes physiques, sensoriels et cognitifs (Vignier et al. 2008; Danet & Haury 2011). Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), plus de 10 % de la population mondiale dépend aujourd'hui d'un handicap ou d'une invalidité partielle ou totale, touchant spécifiquement les fonctions relatives à la motricité générale. Ces limitations engendrent dans de nombreux cas des difficultés dans la réalisation des tâches quotidiennes (cuisiner, se laver, etc.) (Oliver et al. 2001), pouvant aller jusqu'à une perte totale d'autonomie (Bouvier 2009).

Des approches de conception spécifiques ont été développées. Le courant de conception dit « **accessible** » consiste à concevoir des produits **spécifiques** répondant aux personnes déficientes. Nous pouvons par exemple citer les approches de « *rehabilitation design* », « *accessible design* », « *adaptable design* », ou de « *design for disability* » (Erlandson 2007). De nombreuses solutions industrielles se cantonnent souvent à cette approche de conception spécifique. Cependant, celles-ci sont souvent considérées comme "exclusives", car elles ne répondent qu'aux exigences d'une certaine partie de la population (personnes en situations de handicap). Ces conceptions spécialisées se voient ainsi souvent rejetées ou abandonnées par les utilisateurs, et ce pour plusieurs raisons (Triomphe 1999) :

- difficultés quant à l'utilisabilité (apprentissage, manipulation, contrôle, usage courant, etc.) ;
- coût élevé des produits lié à un marché de "niche" ;
- **effets stigmatisant** renvoyés à l'utilisateur et son entourage, notamment dus à un manque d'esthétisme des systèmes proposés.

Pour répondre à ces limitations, de nouvelles approches ont été développées dans l'objectif de concevoir des produits répondant à la fois aux personnes avec et sans handicap, sans chercher de conception spécifique. C'est le principe de la **conception « pour tous »** ou « **universelle** ».

1.2.2 Concept de la conception universelle

De nombreux travaux ce sont développés ces dernières années autour de cette idée de conception *pour tous*, sous différentes terminologies telles que « *conception universelle* » ou « *conception inclusive* » (Keates & Clarkson 2004; Brangier & Barcenilla 2003; Vanderheiden & Jordan 2006; Conte 2004). Bien que ces différentes terminologies présentent de subtiles variations de définitions ou d'approches (notamment dues à l'évolution du concept dans différents pays), l'état d'esprit reste identique, à savoir concevoir des produits et des environnements adaptés au plus grand nombre, sans avoir recours à une adaptation ou conception spécialisée, pouvant être stigmatisante pour l'utilisateur. A noter que dans ce manuscrit, nous ne ferons pas de distinction entre ces différentes

terminologies, et pourrons être amenés tour à tour à parler de conception "pour tous, "universelle", ou "inclusive".

C'est R. Mace, professeur à l'Université de Californie du Nord, qui fonda le concept de conception universelle, et créa en 1989 le « Centre pour le logement accessible », actuellement connu sous le nom de «Centre pour la Conception Universelle». La définition de la conception universelle diffusée par ce centre d'information et de recherche est la suivante :

"La conception universelle est la conception de produits et d'environnements dont l'usage est destiné à tous dans la plus large mesure, sans besoin d'adaptation ou de conception spéciale. Le but du concept "Universal Design" est de simplifier la vie de chacun en fabriquant des produits, des systèmes de communications et en construisant un environnement plus confortable à l'usage pour le plus grand nombre de personnes ; sans coût ou avec un faible coût supplémentaire. Le concept de "conception universelle" vise les personnes de tous âges, toutes tailles et toutes capacités ".

Cette vision universaliste de la conception centrée sur l'homme, contrairement à la conception "spécifique" présentée précédemment, peut donc être considérée comme "inclusive", l'homme étant considéré de manière holistique. Elle représente d'une certaine manière une réponse à des questions d'ordre éthique, apportant l'idée qu'il n'existe pas de discontinuité entre un individu "moyen" et un individu ayant des capacités spécifiques (Newell & Gregor 2000; Brangier & Barcenilla 2003).

Pour tenter de fournir les outils nécessaires à la mise en œuvre de ce concept, le "Centre pour la Conception Universelle" a publié en 1997 les sept principes de la conception universelle. Ces principes sont : (1) usage équitable, (2) flexibilité ou souplesse d'usage, (3) usage simple et intuitif, (4) information perceptible immédiatement donnée par le produit, (5) tolérance à l'erreur, accidentelle ou involontaire, (6) faible niveau d'effort physique, et (7) dimensions et espace libre pour l'approche et l'utilisation. Ils ont pour objectif de servir de lignes directrices pour la prise en compte de la diversité humaine dans une démarche de conception *pour tous* (Story 1998; Preiser 2008). Ils permettent à la fois d'évaluer les produits existants et de guider la conduite du processus de conception (Dupin 2007). Selon Mace et al. (1990), l'intégration de ces principes au plus tôt du processus permet une approche universelle réalisable, et ne coûtant pas plus cher qu'une conception classique.

1.2.3 Démarche de conception

Les courants universalistes utilisent en général une **démarche de conception centrée-utilisateur** basée sur des principes de conceptions à respecter, comme les 7 principes présentés précédemment. La littérature semble cependant montrer que la démarche de conception elle-même reste peu formalisée, et qu'elle est le plus souvent apparentée à un guide de « bonnes pratiques » à suivre. Nous présentons tout de même les variations de telles approches par rapport à une méthodologie centrée-utilisateur « classique ».

Une vision de la conception universelle (ou plus précisément inclusive) définit que "concevoir pour tous = concevoir pour le plus grand nombre + concevoir pour le plus petit nombre ». Une telle approche vise donc à réunir deux démarches pouvant paraître opposées:

- Concevoir des produits "grand public", essentiellement destinés à des individus "moyens", c'est-à-dire adulte bien portant et sans déficiences physiques et cognitives spécifiques;
- Concevoir des produits "spécifiques", destinés aux personnes dites en situation de handicap.

D'un point de vue de la démarche de conception pour tous, deux approches peuvent ainsi être adoptées : une approche **adaptative** (ou top-down) et une approche **proactive** (ou bottom-up). La première consiste à concevoir des produits spécifiques pour après étendre les besoins à d'autres utilisateurs. La seconde consiste à concevoir pour le plus grand nombre et ensuite étendre le spectre pour inclure d'avantage d'utilisateur ayant des besoins spécifiques. Cette dernière peut être vue comme plus proche d'une vision universelle, permettant d'inclure à la base le plus de personnes possible, et donc d'avoir plus de chance d'accommoder un grand nombre d'utilisateurs.

Il est d'ailleurs intéressant de souligner une différence fondamentale entre l'approche ergonomique classique, et l'approche universelle. La conception universelle n'est pas uniquement le résultat d'une topologie optimisée permettant d'accommoder l'utilisateur en fonction de ses besoins et des caractéristiques du problème. L'optique est également de permettre un **réexamen du problème** lors du processus de conception, et spécifiquement durant la phase de génération de concepts. Ainsi, plutôt que de déterminer un niveau d'accommodation ou une gamme de réglages par exemple, la conception universelle doit permettre de proposer de nouvelles solutions là où les approches traditionnelles ne sont pas pertinentes. Le principe de conception universelle est donc réalisable, là où "l'accommodation universelle" n'est généralement pas possible. Ainsi, la conception universelle se distingue par exemple de l'accessibilité, basée sur des réglementations cherchant à établir un niveau minimal nécessaire pour accommoder les personnes handicapées et non sur un réexamen du problème (Salmen 2001).

D'un point de vue global, la conception de produits universels peut être apparentée à un processus de conception itératif, centré sur l'utilisateur, et défini à partir de trois étapes majeures, renouvelées à chaque modification importante du produit en cours de conception (Lonchampt 2004; Plos et al. 2011; Vanderheiden & Tobias 2000; Keates & Clarkson 2004):

- définition du problème : analyse de la situation, des utilisateurs, de leurs capacités, leurs besoins, etc. ;
- développement de solutions : recherche et production de solutions de conception ;
- évaluation des solutions proposées.

L'idée commune réside dans le positionnement des futurs **utilisateurs** (personnes en situation de handicap, etc.) au **cœur du processus de conception** (Newell & Gregor 2000). L'objectif est de pouvoir considérer et intégrer les attentes et besoins des personnes déficientes durant toutes les phases de développement du produit (Newell et al. 2011). Deux approches peuvent ainsi être adoptées pour prendre en compte ses besoins :

- l'utilisateur participe activement au processus de conception de produits ;

- l'analyse et l'intégration des caractéristiques, besoins et attentes des utilisateurs sont réalisées par le biais de l'équipe de conception, composée d'experts métiers en facteurs humains.

Dans le premier cas, **l'utilisateur** devient un **acteur** du processus de conception. Il contribue à l'analyse du problème (étude, questionnaires, etc.), et participe à la conception et à l'évaluation en expérimentant directement la solution proposée. Ces phases exploratoires permettent de combler les lacunes en termes de connaissances du futur utilisateur (manque de bases de données spécifiques par exemple), et ainsi d'évaluer les **exigences requises en termes de capacités pour l'usage du futur produit**. L'usage et l'activité futurs sont donc directement construits par l'utilisateur.

Dans le second cas, **l'utilisateur**, ainsi que ses besoins, sont **représentés** mais ne sont pas directement présents au cœur du processus. L'équipe de conception doit alors s'appuyer sur des outils pour simuler, anticiper, et évaluer l'usage et l'activité future souhaitable, devant répondre à des critères de santé, de sécurité, et d'efficacité.

Cette implication de l'utilisateur n'est pas étonnante car l'approche de conception inclusive repose notamment sur l'application d'une démarche de conception basée sur **l'intégration des modalités d'interaction (sensorielles, cognitives et motrices) entre un utilisateur et un produit** (Keates & Clarkson 2004). C'est l'idée basée sur le modèle de Card et Moran qui définit que lorsqu'une personne interagit avec un produit, ses capacités lui permettent de mettre en place un cycle dans lequel d'abord elle perçoit, puis elle comprend, pour enfin agir sur le produit. Elle permet ainsi de prendre en compte les capacités des personnes dans le processus de conception. L'objectif est de pouvoir relier les utilisateurs aux caractéristiques ergonomiques du produit sous deux angles (Plos et al. 2011) : l'adéquation du dimensionnement du produit avec les données anthropométriques, et l'adéquation des fonctions du produit avec les capacités (sensorielles, cognitives et motrices) de l'utilisateur.

Dans le cas où l'utilisateur n'est pas acteur, les concepteurs doivent s'appuyer sur des **outils permettant d'intégrer les handicaps, voire de simuler l'activité future de l'utilisateur** (chapitre III et IV).

Un des points clés de la démarche de conception pour tous est donc l'intégration du handicap dans le processus, pour concevoir des produits répondant aux besoins des utilisateurs. A ce stade, il nous paraît donc important de faire un point sur les notions de capacité, de handicap et de besoin.

1.2.4 Capacités, handicaps, et besoins spécifiques

Capacités

Nous sommes tous uniques, que ce soit en termes d'âge, de morphologie, de préférences, ou bien de capacités. Les capacités peuvent être définies en trois groupes: les capacités **motrices** (se déplacer, atteindre un objet, etc.), les capacités **cognitives** (penser, communiquer, etc.), et les capacités **sensorielles** (voir, entendre une conversation, etc.). Elles varient intrinsèquement d'un individu à l'autre, en fonction de notre âge, de notre environnement et de notre état de santé, et évoluent tout au long de notre vie, comme représenté Figure 1-4.

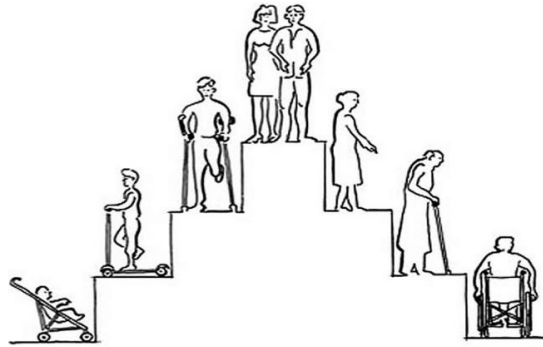


Figure 1-4. Représentation de l'évolution de notre situation physique tout au long de notre vie.

La notion de capacité motrice est intrinsèquement liée à celle de limitation physique. Ces limitations peuvent être dues à une situation temporaire (femme enceinte, personne avec bagages, personne avec un membre plâtré, etc.), permanente (personnes non voyantes, tétraplégique, etc.) ou bien évolutive (vieillesse, maladie dégénérative, etc.). Elles dépendent également de la grande variabilité morphologie existant entre les hommes ; ces différences conditionnant notre capacité physique et affectant directement la manière dont nous utilisons un produit (Story et al. 1998). La Figure 1-5 illustre la grande variabilité morphologique pouvant exister entre les hommes.



Figure 1-5. Carte postale française de 1913 qui prétend montrer le « grand cosaque Russe » jouant aux cartes avec le « Colosse Géant Hollandais », décrit comme pesant 369kg et avec « Nain Puce » qui aurait 70 ans (source : la boîte verte¹).

Dans nos travaux de recherche, nous nous intéressons particulièrement aux **capacités physiques** des utilisateurs, ainsi qu'aux handicaps entraînant une déficience physique/fonctionnelle.

Handicap

La notion de handicap et sa connotation ont évolué en parallèle des modèles qui lui sont associés. Avant la fin des années 1970, le modèle de handicap était copié sur celui du diagnostic médical. Autrement dit, le handicap était fortement associé à une maladie. En 1980, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) publie la CIH (Classification Internationale des Handicaps) (World Health Organisation 1980) et propose une approche du handicap au travers de trois niveaux : déficiences, incapacités, et désavantages. Une **déficience** (*impairment*) définit une perte de substance ou altération d'une fonction ou d'une structure psychologique, physiologique, ou anatomique. Une

¹ <http://www.laboiteverte.fr/un-petit-un-grand-et-un-gros-jouent-aux-cartes-en-1913/>

incapacité (*disability*) représente une réduction partielle ou totale de la capacité d'accomplir une activité d'une façon ou dans les limites considérées comme normale pour un être humain. Celle-ci est la résultante d'une déficience. Un **désavantage** (ou *handicape en fonction de la traduction*) est un préjudice qui résulte de la déficience ou de l'incapacité d'un individu, et qui limite ou interdit l'accomplissement d'un rôle considéré comme normal compte tenu de l'âge, du sexe et des facteurs socioculturels. Ce modèle individuel dans lequel l'individu est porteur du handicap établit une relation de cause à effet entre ces trois niveaux (Figure 1-6). Ainsi, une déficience est considérée comme étant la résultante d'une maladie ou un trouble, entraînant une incapacité et par suite un handicap ou désavantage de l'individu dans la société.

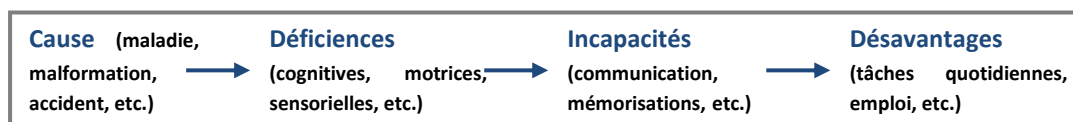


Figure 1-6. Causalité linéaire de la déficience au désavantage (ICIDH).

Cette représentation suggère une progression linéaire simple et définit une relation de cause à effet dans laquelle l'individu est seul responsable de son handicap. La situation est en fait plus complexe, et dépend notamment de la dimension personnelle et environnementale. Par exemple, un enfant atteint d'une intolérance au gluten (maladie coeliaque), bien qu'atteint d'une déficience, peut être en mesure de vivre une vie relativement normale et ne pas souffrir de restriction de l'activité. Il pourrait néanmoins être désavantagé en raison de son incapacité à prendre part à un régime alimentaire normal. Un désavantage peut ainsi résulter d'une déficience sans obligatoirement engendrer d'incapacité. Une personne peut donc présenter une déficience sans présenter d'incapacité, et peut présenter une incapacité sans être handicapé.

Au niveau international, la publication en 2001 de la CIF (Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé) (World Health Organisation 2001) a remplacé la CIH. Dans cette nouvelle classification, il n'y a plus de définition du handicap, mais de l'état de handicap. Cette approche sort de "la dichotomie entre modèle individuel et modèle social, par une conception interactive individu/société du processus de production du handicap". Elle ne concerne pas que les personnes handicapées. Elle est donc **d'application universelle**. La CIF a été notamment conçue dans le but de prendre en compte l'environnement social, et pallier ainsi les limites d'une approche spécifiquement médicale, telle que la posait la CIH. Ce modèle contemporain du handicap reconnaît donc que les environnements sociaux et physiques sont des facteurs dans le processus de production du handicap. Par exemple, les répercussions sur deux personnes ayant la même incapacité peuvent varier énormément selon les facteurs personnels de chacune d'elle. Considérant de manière complémentaire les facteurs individuels et les facteurs environnementaux, la CIF distingue ainsi trois niveaux d'observation : les **déficiences**, les **limitations fonctionnelles** (physiques, cognitives) et les **restrictions** d'activité dans la vie quotidienne (Figure 1-7). Dans nos travaux de recherche, nous nous intéresserons particulièrement aux limitations fonctionnelles physiques.

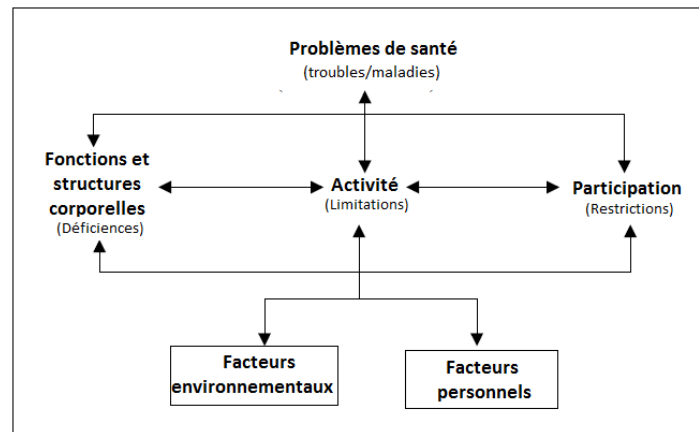


Figure 1-7. Interactions entre les différents composants pouvant mener à une situation de handicap (CIF, 2001).

Besoins spécifiques

La première étape de tout projet est d'identifier le client, ainsi que ses besoins et attentes. Comme présentée paragraphe 1.2.3, la prise en compte et la représentation des besoins des utilisateurs sont essentielles dans une démarche de conception pour tous. Nous pouvons distinguer 3 types de besoins : les **besoins explicites** (dont la personne est consciente), les **besoins implicites** (non explicitement exprimés car semblant évident pour l'utilisateur, mais qui sont pourtant bien réels), et les **besoins latents** (dont la personne elle-même n'a pas conscience, mais qui se créeront dans le futur). Cette idée est graphiquement représentée par la "métaphore de l'iceberg" Figure 1-8.



Figure 1-8. Métaphore de l'iceberg appliquée aux besoins (explicites, implicites, et latents) des utilisateurs.

Ces différents « niveaux » de besoins posent la question de la probable difficulté pour les concepteurs de comprendre les réels besoins des utilisateurs (Wright 2014). Les besoins étant intrinsèquement liés à la variabilité anthropométrique et aux capacités physiques des utilisateurs, ceci est d'autant plus vrai pour des utilisateurs en situation de handicap. Classiquement, ce sont souvent les besoins explicites qui sont principalement pris en compte. Ils peuvent être évalués par différents moyens, comme des observations, des enquêtes, des entretiens ou des simulations. Les besoins implicites et latents sont quant à eux plus difficiles à évaluer car l'utilisateur lui-même n'en a pas conscience. Dans ce cas, les concepteurs doivent faire appel à la fois à leurs compétences, et à

des outils leur permettant de mieux comprendre et appréhender l'impact de déficiences physiques sur l'activité de l'utilisateur, et sur l'usage associé au produit à concevoir.

Le paragraphe suivant traite des moyens d'intégration et de prise en compte des caractéristiques et besoins spécifiques.

1.2.5 Prise en compte des besoins et handicaps par les concepteurs

Classiquement, la prise en compte des handicaps dans la conception peut être réalisée par le biais d'observations, d'entretiens, et de tests en situations réelles, impliquant directement des personnes déficientes (Demirbilek & Demirkan 2004). Cette approche implique de disposer de prototypes physiques et d'un panel de personnes représentatives, ce qui peut être coûteux et **difficile à mettre en place, notamment dans les phases amonts de conception**. En plus de ces approches, un ensemble d'outils est maintenant proposé aux concepteurs, permettant à la fois une sensibilisation à la démarche de conception universelle, et un soutien pour comprendre, quantifier, et ressentir les situations de handicaps². L'objectif étant de mieux intégrer les caractéristiques, besoins et attentes des utilisateurs dans le processus de conception. Nous pouvons citer l'exemple des **interfaces physiques** permettant de simuler certains handicaps en contraignant directement l'utilisateur (Figure 1-9). Ceci permet de fournir des données qualitatives liées au ressenti physique (Cardoso & Clarkson 2012). Ces moyens technologiques sont cependant destinés à la simulation de déficiences ou de handicap spécifique, et ne fournissent que difficilement des données quantitatives. Certaines **interfaces logicielles** permettent à la fois de fournir des indicateurs quantitatifs (pourcentage d'accommodation attendu par exemple), ainsi que des données qualitatives (représentation d'un handicap visuel par exemple) liées aux capacités physiques spécifiques des sujets. C'est le cas par exemple de "l'Inclusive Design Toolkit", développé par l'Université de Cambridge³ (Clarkson et al. 2007). Cependant, on peut déplorer ici un manque de contexte et d'interaction avec le produit, et par conséquent un manque de ressenti physique des déficiences.

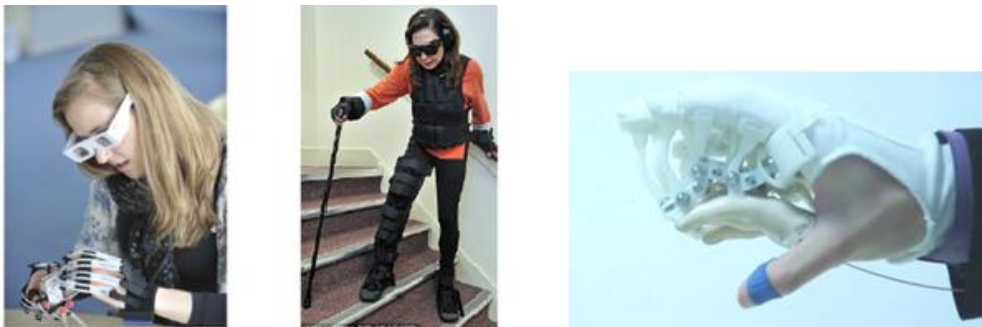


Figure 1-9. Gauche : gants et lunettes simulant une limitation de capacité (Cambridge (2013)). Centre : combinaison pour simuler les limitations de mouvements des personnes âgées (Mid Yorkshire Hospitals (2014)). Droite : Système de main passive permettant de simuler les capacités de préhension d'un jeune enfant (Projet "Childhood").

1.2.6 Utilisation des modèles numériques en conception universelle

Comme présenté paragraphe 1.1.5, plusieurs auteurs ont déjà souligné l'intérêt des simulations par mannequin numérique dans le processus de conception centrée-utilisateur. En effet, selon Chitescu et al. (2003) et Sagot et al. (2005), ces modèles permettent d'intégrer le facteur humain lors des

² <http://designingwithpeople.rca.ac.uk/methods>

³ <http://www.inclusivedesigntoolkit.com/betterdesign2/>

phases amont du processus, de tester les concepts numériques retenus, et de mieux appréhender les situations dans lesquelles les utilisateurs vont se trouver. De nombreux travaux basés sur ces outils se sont logiquement développés en conception universelle pour tenter de simuler et d'intégrer les personnes en situation de handicap dans le processus de conception (Case et al. 2001; Palmon et al. 2004).

Parmi les approches les plus abouties, nous pouvons citer l'outil HADRIAN développé par l'université de Loughborough au Royaume-Uni (Marshall et al. 2002; Marshall et al. 2004; Marshall et al. 2010; Porter et al. 2004). Celui-ci est basé sur l'utilisation du logiciel de modélisation SAMMIE et permet l'évaluation du niveau d'inclusion d'une conception, à partir des données anthropométriques et fonctionnelles de sujets spécifiques. Le mannequin numérique simule l'activité de l'utilisateur, et évalue l'ergonomie du produit (numérique) à partir de données fonctionnelles (limites articulaires) représentatives de l'utilisateur (Figure 1-10). Les analyses permettent ainsi de définir un pourcentage d'exclusion en fonction du nombre de sujets (mannequins) ayant réussi la tâche étudiée.



Figure 1-10. Evaluations de l'inclusive d'environnement par le mannequin SAMMIE (utilisé dans l'outil HADRIAN).

Plus récemment et toujours dans une démarche universelle, nous pouvons également citer le projet VICON (Modzelewski et al. 2012; Kirisci et al. 2012). Celui-ci vise à soutenir le processus de développement de produits inclusifs, en permettant d'effectuer des tests virtuels au travers d'un **modèle virtuel de l'utilisateur**, présentant des déficiences visuelles, auditives, ou encore de préhension. L'utilisateur virtuel est utilisé, au travers de générations de tâches et de comportements prédéfinies, pour évaluer l'utilisabilité de produits de grande consommation.

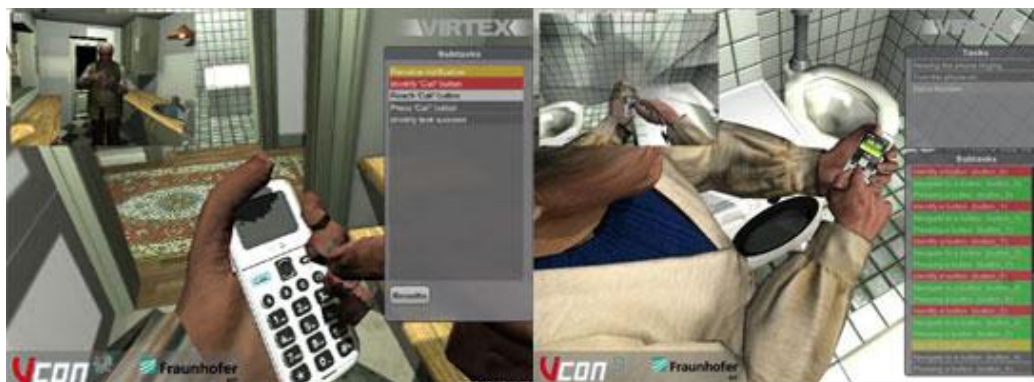


Figure 1-11. Modélisation virtuelle de l'usage d'un téléphone portable (source : VICON).

A noter que la démarche a été développée pour deux produits spécifiques, à savoir une machine à laver et un téléphone portable (Figure 1-11). Ces produits représentent donc les deux seuls concepts pouvant être (d'après nos informations) évalués à ce jour par cette application. En effet, la mise en œuvre des tests virtuels est actuellement très fastidieuse, exigeant un effort intensif de développement. De plus, d'après les auteurs eux-mêmes, **davantage de développements** seraient nécessaires pour créer des **représentations plus réalistes des mouvements et comportements** des utilisateurs virtuels, ainsi que de leurs interactions avec l'EV (environnement virtuel). Ces comportements étant prédéfinis, il n'est en effet pas possible de prendre en compte l'influence des caractéristiques cognitives, sensorielles, et physiques des utilisateurs sur l'évaluation (le modèle de tâche ne permettant pas de définir différentes méthodes d'exécution). Ainsi, la démarche de conception est plus conduite par la définition de légères variations de solutions existantes, plutôt que par l'exploration de nouveaux concepts.

Nous pensons que l'intégration d'une approche inclusive au travers de modèles d'utilisateurs virtuels spécifiques tels que proposés par le projet VICON peut être une démarche efficace pour la conception universelle. Cependant, une plus grande flexibilité dans la définition des déficiences, ainsi **qu'une interaction plus réaliste entre le mannequin et l'EV** devrait être développée.

Bien que les simulations par mannequins numériques semblent être un support de conception efficace, plusieurs limitations peuvent donc être soulevées quant à la simple utilisation de ses modèles.

1.3 Limitation des représentations numériques dans une démarche de conception centrée-utilisateur et pour tous

Nous proposons de résumer les principaux manques des mannequins numériques dans une démarche de conception centrée-utilisateur et universelle au travers de plusieurs points : d'un point de vue des simulations posturales et gestuelles proposées, de l'intégration des déficiences, de l'interaction et de l'usage, et enfin en tant qu'objet de conception.

Simulations posturales et gestuelles

La structure cinématique des mannequins numériques est variable d'un modèle à l'autre. Dans de nombreux cas, les mannequins utilisés permettent de ne reproduire qu'un nombre limité de postures et gestes de l'homme (Chitescu (2005) par exemple). Les méthodes les plus couramment utilisées pour la définition de posture des mannequins numériques se font soit en manipulant manuellement chaque articulation (cinématique directe), soit en déplacent la partie du corps voulue (main par exemple) pour atteindre un point donné (cinématique inverse) (Monnier et al. 2009). Cependant, ces méthodes sont longues et subjectives due à la manipulation manuelle des membres. La manipulation clavier/souris ne permet pas toujours une définition de postures réalistes, et peut donc engendrer des analyses basées sur des postures non correctes. De plus, seule la posture finale est souvent définie, et donc les mouvements réalisés pas considérés (Abdel-Malek & Arora 2009).

Des méthodes existent tout de même pour prendre en compte ces mouvements (Pasciuto et al. 2011). Une première approche (data-based method) consiste en la simulation des mouvements du

mannequin à partir de données préalablement capturées (Park 2008). Un acteur exécute le mouvement souhaité, et un ensemble de dispositifs est utilisé pour enregistrer les configurations articulaires des membres. Les données enregistrées sont ensuite utilisées pour générer automatiquement le mouvement voulu du mannequin. Dans Chang & Wang (2007) par exemple, cette approche est utilisée pour l'évaluation ergonomique de postes de travail. Cependant, cette technique implique quelques limitations. En effet, les mouvements sont enregistrés en situation réelle, ce qui implique de faire appel à un environnement ou prototype déjà existant. De plus, les mouvements sont dans ce cas seulement générés pour des tâches spécifiques. Le comportement du mannequin virtuel n'est donc que difficilement adaptable en fonction d'un changement de conditions d'étude (les données virtuelles et réelles devant être identiques). Enfin, les caractéristiques du mannequin virtuel sont identiques à celles de l'opérateur, ce qui implique de faire appel aux réels utilisateurs finaux dans le processus. D'autres approches (physics-based methods) sont basées sur des modèles cinématiques, et prennent en compte de multiples critères tels que les amplitudes de mouvements, les contraintes articulaires, les efforts etc., pour construire et prédire le mouvement. Cependant, nombreux de ces modèles sont basés sur des calculs complexes et utilisent des méthodes d'optimisation pouvant être lentes à converger, ce qui n'est pas adapté pour des simulations en temps réel. Or, la simulation du mouvement doit pouvoir s'adapter automatiquement et en temps réel à la situation rencontrée (Chaffin 2005), tout en tenant compte des modèles biomécaniques et dynamiques complexes des mouvements du corps humain. Par exemple, il est très difficile de définir des modèles biomécaniques statiques permettant de simuler le comportement complexe de l'épaule dans des conditions dynamiques (Chaffin 2002). Ces caractéristiques sont cependant très importantes à prendre en compte, notamment lors d'études d'accessibilités (poste de travail, poste de pilotage, etc.), où l'atteinte des différents points de l'environnement dépend grandement des caractéristiques biomécaniques et dynamiques du sujet. De nombreux logiciels proposent des modèles de mannequins numériques incluant des propriétés biomécaniques du corps humain, pour tenter de prendre en compte ces facteurs pouvant affecter l'atteinte d'un individu, comme les mouvements des épaules et du tronc par exemple (Chaffin 2002). Cependant, ces modèles de cinématiques inverses ne sont pas toujours représentatifs des réelles caractéristiques biomécaniques et comportementales du corps humain (Chaffin 1999). De plus les mouvements sont tous fondés sur des principes empruntés à la robotique, la reproduction de mouvements est moins fluide que ceux du corps humain. Ainsi, pour Lämkkull et al. (2009) la question se pose de la précision des analyses des mannequins virtuels par rapport à une tâche réelle.

Il peut donc être difficile, dans certaines conditions, de définir des postures et comportements de mannequins représentatifs d'une situation d'étude réelle. Or la définition de postures réalistes est essentielle pour toute utilisation de mannequins dans la conception de produits.

Intégrations de capacités physiques spécifiques

Les simulations des handicaps par mannequins numériques sont souvent cantonnées à une représentation de personnes en fauteuil roulant. Certains travaux tentent d'intégrer des déficiences fonctionnelles par le biais de limitations articulaires dans la chaîne cinématique du mannequin. Cependant, ces représentations ne permettent pas la prise en compte réaliste des comportements associés, comme les stratégies d'adaptations employées par exemple.

Objet de conception

Les mannequins numériques relèvent également une insuffisance dans le processus de conception centré sur l'utilisateur, d'un point de vue de la communication entre les acteurs métier. En effet, bien que ces simulations représentent un bon support de représentation mentale, de verbalisation, et donc de communication entre les concepteurs, nous pensons que le manque d'interaction fourni limite quelque peu leur potentiel de « médiateur de la conception ».

Interaction et usage

Le passage des simulations numériques, faites à l'aide du mannequin, à la réalisation d'un prototype matériel reste encore difficile. En effet, le « tout numérique » n'a pas vocation à anticiper tous les problèmes de conception et en particulier ceux liés à la fonction d'usage (Sagot et al. 2005). Ces outils de simulation présentent un intérêt certain pour la définition et l'évaluation ergonomique des produits numériques, mais n'apportent pas aux concepteurs un niveau d'interaction et d'immersion suffisant pour appréhender la notion d'usage dans sa globalité (Mahdjoub 2007). En effet, la visualisation et l'interaction sont souvent limitées à une interaction de type clavier-souris face à un simple ordinateur. Les experts en facteurs humains **ne peuvent donc pas se mettre à la place de l'utilisateur** comme pour une situation réelle, et ainsi **ressentir les contraintes** liées à l'usage du produit, et **percevoir de manière naturelle les éléments subjectifs** de la conception. Les mannequins numériques seuls leurs permettent seulement de les imaginer.

Ce manque d'interaction induit un usage vécu "par procuration", et donc un manque d'appropriation et d'expérience de l'activité souhaité par les acteurs de la conception (Chitescu 2005). Cette limitation, souvent couplée à une simulation scénarisée de l'activité, engendre également une limitation de la capacité des concepteurs à anticiper les activités de l'utilisateur face à un nouveau produit, ou à une modification des conditions d'utilisations (changement d'environnement, etc.). Ceci induit intrinsèquement une autre limitation qui est que ces simulations numériques classiques ne permettent pas de prendre en compte (ou difficilement) les capacités liées à l'ergonomie cognitive (l'ouïe, la communication, la réflexion, etc.) (Thorvald et al. 2012).

1.4 Vers une optimisation du concept numérique

Depuis quelques années, la réalité virtuelle semble être envisagée comme un outil efficace pour supporter le processus d'évaluation et de conception (interactivité entre l'homme et le système, évaluation collaborative, etc.), mais également la prise en compte de la fonction d'usage du produit (Burkhardt 2003). La réalité virtuelle peut en effet permettre d'entraîner une personne dans une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement et pouvant simuler certains aspects du monde réel (Fuchs & Moreau 2003). Ainsi, certains auteurs ont souligné le potentiel de cet outil comme soutien aux acteurs de la conception, pour mieux simuler l'activité des utilisateurs et optimiser la collaboration entre les acteurs métier (Sagot et al. 2005; Mahdjoub 2007; Bennes 2013).

Nous proposons donc dans le paragraphe suivant de présenter la réalité virtuelle et ses concepts, et de mettre en avant son application et ses apports dans la conception centrée sur l'homme.

2 La réalité virtuelle en conception de produit centrée sur l'homme

2.1 Définition de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle (RV), ou tout du moins le terme "réalité virtuelle" n'est plus réservé à un public de scientifiques ou d'industriels spécialisés. L'apparition de nouvelles technologies interactives accessibles à tous et leurs applications dans les domaines du divertissement ont largement contribué à cette démocratisation. Les médias emploient ce terme tantôt pour les jeux vidéo, tantôt pour vanter le réalisme d'effets spéciaux créés pour un film. Pourtant, les concepts associés à ce domaine sont bien plus complexes, et reposent sur de multiples champs scientifiques, allant de l'informatique, la robotique, la mécanique, l'optique, l'ergonomie, à la psychologie et aux sciences humaines en générale.

La définition même de réalité virtuelle est sujette à débat au sein de la communauté scientifique. En effet, cet oxymore vient de l'expression anglaise *virtual reality* définie en 1989 par Jaron Lanier (Kelly et al. 1989). Cependant, le terme *virtual* en anglais peut signifier "de fait", "pratiquement", "quasiment". La traduction française ne rend pas compte de cette signification. Selon Fuchs & Moreau (2003), l'expression de *réalité vicariante* aurait d'ailleurs été plus adéquate.

La littérature fournit de nombreuses définitions de la réalité virtuelle, tantôt assez généralistes (Morris, 1992), tantôt technologiques (Pimentel et al. 1994; Ellis 1991; Sherman & Craig 2002), tantôt sur des concepts tels que l'interaction, l'immersion, et la présence (Arnaldi et al. 2003; Burdea & Coiffet 1993; Bouvier 2009; Zeltzer 1992).

Dans un souci de clarté, nous proposons de présenter la RV par une approche fondatrice définie par Fuchs & Moreau (2003), proposant une définition sur trois niveaux : technique, fonctionnelle, et d'un point de vue de la finalité de la RV.

Définition technique: *"La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler, dans un monde virtuel, le comportement d'entités 3D étant en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs, eux-mêmes en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de leurs canaux sensori-moteurs".*

Définition fonctionnelle: *"La réalité virtuelle va permettre à l'homme de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et(ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique".*

Finalité de la RV : *"La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel".*

La définition de la finalité de la réalité virtuelle fait référence à l'activité physique et cognitive de l'utilisateur au sein du monde virtuel. La définition fonctionnelle fait référence à la réalité alternative (monde virtuel) proposée à l'utilisateur. La définition technique permet de décrire avec efficacité les fonctionnalités d'un dispositif de réalité virtuelle permettant d'extraire l'utilisateur du monde réel (ou physique). Le terme interface comportementale de la définition technique fait référence à un dispositif qui exploite la perception et la motricité à la base du comportement humain. Cet interfaçage de l'utilisateur avec le monde virtuel s'effectue aussi bien sur le plan physique que cognitif au travers des deux concepts fondamentaux de **l'immersion** et de **l'interaction** de l'utilisateur avec le monde virtuel (Fuchs et al. 2006). Cette **approche anthropocentrée de la réalité virtuelle** est basée sur "l'activité du sujet" et non sur "la communication du sujet avec une machine".

Nous proposons de définir plus précisément ces deux notions essentielles que sont l'immersion et l'interaction, et leurs enjeux en RV.

2.2 Concepts d'interaction et d'immersion

Interaction

L'interaction en réalité virtuelle est un facteur important permettant d'interagir avec les éléments d'un environnement numérique. Elle résulte de l'interfaçage de l'utilisateur avec l'environnement virtuel, au travers « d'interfaces comportementales » (Fuchs 1996). Une interface comportementale est constituée d'un périphérique d'interaction et d'un ensemble de processus logiciels permettant d'interpréter les signaux émis par ce périphérique, pour les transmettre au monde virtuel. Celles-ci permettent d'exploiter la perception et la motricité de l'homme à la base du comportement humain. On retrouve ainsi les interfaces **sensorielles**, **motrices**, et **sensori-motrices**, informant à la fois l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel, et le système des actions motrices de l'homme sur le monde virtuel. Ce transfert d'informations continu est le pendant de la boucle "perception, cognition, action" du comportement de l'homme dans le monde réel (définie par le modèle de Card et Moran (Card et al. 1980)).

Afin d'obtenir une interaction la plus intuitive et naturelle possible, l'interface avec le monde virtuel doit devenir "transparent" pour l'utilisateur. A un **niveau physique**, cela signifie que l'interface ne gênera pas l'utilisateur dans ses mouvements lors de l'interaction avec l'environnement virtuel (transmission des stimuli-sensoriels et des réponses motrices sans support matériel par exemple). A un **niveau psychologique**, les modifications engendrées par les actions de l'utilisateur devront être en parfaite adéquation avec le processus cognitif engendré lors de la tâche (Burkhardt 2007). Cette idée est basée sur le principe que "ce qui se fait naturellement dans le monde réel se fait inconsciemment et donc sans (ou peu) effort mental". Ainsi, si l'interaction est suffisamment proche d'un comportement que l'utilisateur aura déjà rencontré dans le monde réel, cette interaction se fera de manière transparente et ne nécessitera pas de grand effort mental de la part de l'utilisateur.

Afin de rapprocher le comportement désiré par l'utilisateur et le comportement effectif de l'interface comportementale, il est possible d'utiliser ce que Fuchs & Moreau (2003) nomment des schèmes et métaphores d'interaction. Ces termes font références à l'exploitation de processus cognitifs déjà acquis ou bien à des images symboliques de l'action souhaitée pour permettre à l'utilisateur de

réaliser la tâche le plus naturellement possible. Ces schèmes et métaphores font partie d'une démarche de conception proposée par Fuchs & Richir (2006), permettant de guider la construction d'un dispositif de réalité virtuelle. Cette approche, appelé approche I², basée sur les deux notions fondamentales de l'immersion et l'interaction, est construite autour de trois niveaux d'interaction et d'immersion (sensori-motrices, cognitives, fonctionnelles). Une application pratique de cette démarche est appliquée chapitre III et détaillée en Annexe B.

Immersion

En réalité virtuelle, le terme "immersion" est souvent employé dans des formules du type "immersion dans un monde virtuel", "interfaces et systèmes immersifs" ou encore "utilisateur immergé". L'immersion caractérise la relation du sujet avec l'environnement virtuel (EV), dans l'environnement réel. Burkhardt (2003) définit l'immersion comme le degré avec lequel l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action. L'immersion est souvent comprise comme *l'exposition du sujet à un EV au moyen de dispositifs occultant en partie la perception* (surtout visuelle) de l'environnement aux alentours, pour afficher en lieu et place une image du monde virtuel (Fuchs & Moreau 2003). La littérature distingue deux formes complémentaires d'immersion: **l'immersion physique** (ou sensorielle) et **l'immersion mentale** (ou présence).

La présence est "un phénomène d'ordre psychologique qui conduit l'utilisateur immergé à développer le sentiment d'être présent au sein du monde virtuel" (Slater et al. 1994).

Le sentiment de présence peut être vu comme le fait de réagir physiquement, physiologiquement et émotionnellement, comme si les événements et objets virtuels présentés étaient réels (Sanchez-Vives & Slater 2005). Ce sentiment peut ainsi amener l'utilisateur à agir dans l'environnement virtuel de manière similaire (en manifestation, en intensité et en qualité) à ce qu'il ferait dans une situation réelle (Slater & Wilbur 1997; Lombard & Ditton 1997).



Figure 2-1. Vision "immersive" du démonstrateur développé par Valve Compagnie.

M. Abrash⁴ explique cette notion au travers d'une expérience où un utilisateur est virtuellement positionné sur une corniche, suspendu dans un cube géant texturé avec de simples pages web (Figure 2-1). Bien que cet environnement ne soit pas représentatif d'une situation réaliste, l'immersion mentale induit tout de même chez le sujet le sentiment que *"même si je sais avec certitude que je suis dans une salle de démonstration, vêtu d'un casque immersif, regardant des images à l'intérieur d'un cube, mon corps sait que je suis au bord d'une falaise"*. Seule une immersion

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=dxbh-TM5yNc>

mentale peut être capable d'induire un tel sentiment chez le sujet. La présence est donc une notion difficile à définir car liée à "l'expérience", autrement dit "*vous comprenez le sentiment de présence une fois que vous y êtes confronté et que vous le vivez*" (M. Abrash).

L'immersion peut ainsi permettre d'impliquer physiquement un individu dans une **activité naturelle et réaliste** conditionnée par l'environnement simulé. Nous reviendrons sur cette particularité dans la suite du manuscrit.

2.3 Interfaces comportementales

Comme dit précédemment, les interfaces comportementales sont utilisées pour permettre une interaction et une immersion de l'utilisateur dans l'EV. La réalité virtuelle exploite et développe quatre catégories d'interfaces (Fuchs 1996) : les dispositifs de capture de position et de mouvement (capteurs, gant, combinaison, etc.), les dispositifs de présentation visuelle (grand écran, casque, etc.), les dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés (touché, chaleur, etc.), les dispositifs d'entrée et de présentation sonore (son spatialisé, reconnaissance vocale, etc.). Nous nous concentrons ici sur quelques exemples d'interfaces comportementales et de dispositifs de réalité virtuelle classiquement considérés comme immersifs (principalement d'un point de vue visuel).

2.3.1 Dispositifs "Immersifs"

Les visiocasques ou HMD (Head Mounted Display)

Historiquement, les HMD ont été les premiers systèmes immersifs et ont porté l'image de la RV. Le visiocasque permet une **immersion visuelle totale** de l'utilisateur et donc un isolement essentiel pour l'immersion. Un certain nombre de défauts ont souvent été reprochés à ces systèmes (poids élevé, champs de vision limité, troubles et fatigues visuelles dues à une fréquence de rafraîchissement trop faible des images). Cependant, les importants progrès techniques réalisés ces dernières années ont permis de résoudre ces problèmes. La Figure 2-2 présente différents types de casques immersifs ainsi que leurs évolutions avec le temps.

Les salles immersives ou CAVE

Les CAVE et salles immersives permettent également d'immerger un utilisateur dans un environnement à l'échelle 1 (Figure 2-3). Ce sont les systèmes immersifs les plus imposants. Ils associent plusieurs écrans disposés orthogonalement sur lesquels est projetée une scène en relief entourant l'utilisateur immergé. Les CAVE peuvent disposer d'un nombre plus ou moins important de faces de projection : de 2 jusqu'à 6 pour un cube complet.

Contrairement aux casques, les projections sur écrans de ces dispositifs implique un retour visuel du monde réel. La **vision n'est pas totalement coupée du monde extérieur** et l'utilisateur peut donc voir son corps pendant les simulations (nous reviendrons sur ce point dans la suite du manuscrit). L'avantage de ces salles est qu'elles permettent à plusieurs utilisateurs de visualiser simultanément le même environnement virtuel. Cependant ces dispositifs nécessitent souvent un bâtiment ou une structure dédiée. Ce sont donc des systèmes complexes et onéreux (contrairement aux casques immersifs), ce qui explique qu'ils ne sont souvent rencontrés que dans les grands groupes industriels ou les instituts de recherche. Nous pouvons également citer le développement de nouveaux systèmes tels que le Hyve-3D (Hybrid Virtual Environment 3D) développé par le laboratoire de

recherche Hybridlab de l'Université de Montréal⁵. Bien que ce dispositif n'ait pas les mêmes fonctions immersives qu'un CAVE, il permet une vision de l'environnement à l'échelle 1 (Figure 2-3), pour un coût financier moindre et une plus grande facilité de déplacement.

2.3.2 Dispositifs d'interaction

Parmi les dispositifs d'interaction nous retrouvons les interfaces haptiques permettant de confronter l'utilisateur à des contraintes physiques générées par un environnement virtuel (bras à retour d'effort, systèmes à câbles, etc.) (Buoguilu et al. 2001), et les interfaces de localisation permettant de détecter les mouvements corporels de l'utilisateur. Nous nous intéressons ici à ces dernières.



Figure 2-2. Evolution des Visiocasques ou HMD (Head Mounted Display).

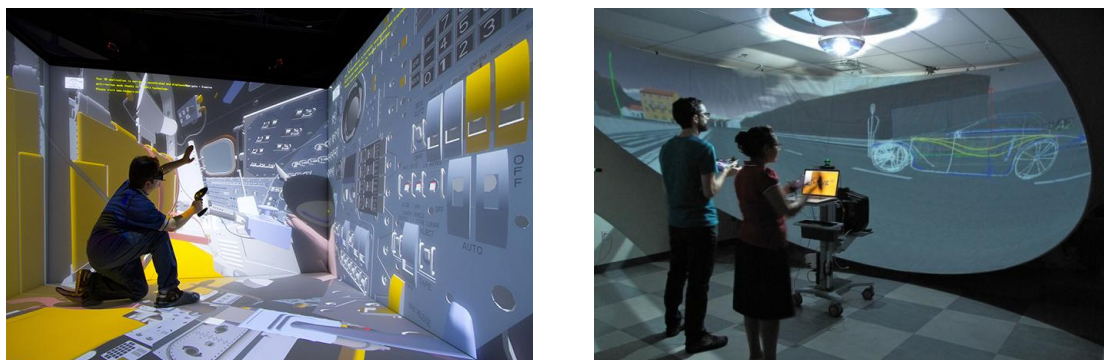


Figure 2-3. Gauche : système de type CAVE™. Droite : concept Hyve-3D développé par le laboratoire de recherche Hybridlab de l'Université de Montréal (Dorta et al. 2009; Dorta et al. 2012).

⁵ <http://www.hyve3d.com/>



Figure 2-4. Opérateur portant un système de capture de mouvement optique avec marqueurs.

Interfaces de localisation (captures de mouvements)

De nombreux systèmes permettant de tracker les mouvements du corps humain sont disponibles, et développés à partir de différentes technologies. Nous pouvons citer par exemple les systèmes mécaniques, électromagnétiques, inertiels, ou encore les systèmes optiques, que nous présentons ici.

Les systèmes optiques sont traditionnellement composés de marqueurs positionnés sur le corps (Figure 2-4), permettant de détecter en temps réel la position des membres dans l'espace. Ces marqueurs peuvent être actifs ou passifs. Le principe de fonctionnement des marqueurs actifs est celui "d'émetteur-récepteur", c.-à-d. que les marqueurs émettent directement un signal infrarouge capté par des cellules photosensibles. Les marqueurs passifs sont généralement des boules réfléchissantes captées par triangulations à l'aide de plusieurs caméras. Les caméras émettent un rayonnement infrarouge, réfléchi par les marqueurs dont la surface est composée d'une matière réfléchissante, puis renvoyé à ces mêmes caméras. Ces systèmes sont très utilisés car présentant de nombreux avantages. Ils ne requièrent pas de câble et permettent donc plus de **liberté de mouvement**, le taux d'échantillonnage est élevé permettant d'avoir un suivi très "propre" et précis des données, pour suivre plusieurs sujets.

2.3.3 Le pseudo-haptique

Les interfaces à retour d'effort (ou haptiques) permettent d'appliquer à l'utilisateur des contraintes physiques générées par un environnement virtuel. Ces dispositifs peuvent s'avérer intéressants pour permettre une interaction « physique » avec l'EV. Cependant, ces techniques faisant appel à des dispositifs physiques, le comportement de l'opérateur en interaction avec le monde virtuel n'est généralement pas représentatif de ce qu'il serait dans le monde réel.

Le retour pseudo-haptique est une technique permettant de simuler les sensations haptiques sans recourir à des dispositifs de retour physiques direct, et donc sans contraindre directement le comportement naturel de l'utilisateur. Les sensations haptiques sont virtuellement simulées en capitalisant les propriétés de la perception humaine. La vision est utilisée pour modifier la perception haptique et engendrer une illusion de retour d'effort physique sur l'utilisateur. Il peut être utilisé

pour simuler différentes propriétés comme la raideur d'un ressort virtuel, le poids d'un objet, ou la texture d'une image par exemple (Lecuyer 2009).



Figure 2-5. Simulation pseudo-haptique de la force d'un écoulement de fluide sur la main de l'utilisateur. Gauche : l'opérateur bouge la main pour compenser l'impact virtuel de l'écoulement du fluide. Droite : vision de la main virtuelle dans le visiocasque (Pusch et al. 2009).

Dans Gomez Jauregui et al. (2014), le principe du pseudo-haptique est utilisé pour simuler la perception de poids en modifiant en l'animation visuelle d'un mannequin virtuel. Dans Pusch et al. (2009), le pseudo haptique est utilisé pour simuler la force d'un écoulement sur la main d'un sujet visuellement immergé dans un environnement virtuel à l'aide d'un visiocasque (Figure 2-5). Ainsi, l'utilisation des propriétés pseudo-haptique peut être très intéressante car un individu peut ressentir une sensation d'effort en étant immergé dans un monde virtuel sans avoir besoin d'interfaces physiques (bras à retour d'efforts par exemple). Ainsi, l'encombrement est moindre, les mouvements non contraints et l'interaction du sujet avec l'EV plus naturel.

De notre point de vue, ce principe de pseudo haptique directement appliqué aux mouvements de l'utilisateur est une approche intéressante pour une simulation des contraintes la plus naturelle possible. Nous reviendrons sur ce point dans le Chapitre IV.

2.4 La réalité virtuelle en conception de produits centrée sur l'utilisateur

Comme présenté précédemment, les outils de RV vont servir d'interface entre l'utilisateur et le monde virtuel, permettant à celui-ci d'interagir, voire d'être immergé dans l'EV. D'un point de vue de la conception de produit, ces particularités vont permettre d'exploiter et d'optimiser plusieurs aspects de la conception, pouvant être limités avec l'utilisation d'outils « classiques ». Nous proposons de souligner les apports de la RV en conception de produits anthropocentrée sous différents points.

Processus de conception de produit

De nombreux travaux se sont intéressés à l'intégration de la réalité virtuelle dans le processus de conception (Ottosson 2002; Chedmail et al. 2002), le plus souvent par une approche centrée sur le produit (Jayaram et al. 1999; Bao et al. 2002; Viganò et al. 2004; Mengoni & Germani 2006). La RV est surtout utilisée par les entreprises dans des phases d'études de faisabilité (De Sa & Zachmann 1999).

Selon Chedmail et al. (2001), l'utilisation de la RV permet aux concepteurs de développer une meilleure connaissance du produit, plus rapidement. En interagissant en situation sur le produit (prototype virtuel) avant que ce dernier soit réellement fabriqué, les concepteurs peuvent détecter au plus tôt les erreurs de conception. Ainsi, ils peuvent corriger les erreurs avant que celles-ci n'aient une influence importante sur le coût final de conception du produit (évitant la réalisation longue et coûteuse de multiples maquettes ou de prototypes physiques). La RV aurait donc un impact direct sur les coûts de mise sur le marché, mais également sur les délais, ainsi que sur la qualité globale de la conception. Outre ces aspects, l'utilisation de la réalité virtuelle peut permettre d'optimiser de nombreux aspects de la conception comme par exemple la visualisation de phénomènes physiques, la simulation d'assemblage et de maintenance, l'analyses de données complexes, ou encore la communication entre les différents corps de métier (Fuchs & Moreau 2001).

Travail collaboratif délocalisé

Plusieurs auteurs ont souligné l'apport de la réalité virtuelle pour optimiser la collaboration entre les différents acteurs du processus de conception (Fischer & Troussier 2004; Bazzaro et al. 2012). Ils peuvent en effet concevoir et interagir ensemble et en temps réel sur un prototype virtuel, tout en étant délocalisés (voir par exemple Dang et al. (2008)), et ainsi partager la même vision du produit (Daily et al. 2000).

Etude des facteurs humains

Plusieurs auteurs ont également souligné l'intérêt de la réalité virtuelle dans la conception ergonomique de produits centrées sur l'utilisateur (Bullinger et al. 1999; Jayaram et al. 2001; Chedmail et al. 2002; Burkhardt 2003; Fuchs & Richir 2003; Richir 2003; Fischer & Troussier 2004). Pour Whitman et al. (2004), la réalité virtuelle peut être utilisée pour réaliser des évaluations ergonomiques réalistes. Des dispositifs de visualisations (le plus souvent immersifs) vont pouvoir permettre aux ergonomes d'évaluer subjectivement les propositions de conception. Les maquettes et mannequins numériques sont utilisés pour effectuer des analyses sans mettre en place (du moins dans un premier temps) de maquettes physiques. L'utilisateur immergé va par exemple pouvoir évaluer d'un point de vue réaliste, l'accessibilité et le confort de l'intérieur d'un véhicule et la visibilité de la route par le conducteur (Fuchs & Moreau 2003; Moreau 2009), et ainsi mieux valider la pertinence de certains choix de conception. A travers cette utilisation, il est ainsi possible d'évaluer rapidement, et de manière économique, un nombre plus important d'hypothèses, très tôt dans le processus de conception (Reuding & Meil 2004; Söderman 2005; Lorisson 2010).

Médiateur de la conception

Pour Benne (2013), les outils de réalité virtuelle peuvent être vus comme des objets intermédiaires de conception efficace, permettant de fournir une représentation commune du futur produit, ainsi qu'un langage commun (« universel » selon Fuchs & Richir (2006)) à tous les acteurs de la conception. En effet, la RV peut être considérée comme un support neutre n'étant lié à aucun domaine d'expertise en particulier, permettant d'échanger en direct autour de la représentation et de la mise en situation virtuelle du concept (l'image interactive étant souvent plus claire qu'un long

discours). Les représentations virtuelles étant faciles à comprendre pour tous les acteurs de la conception, ils peuvent ainsi échanger en direct leurs points de vue respectifs liés à leurs domaines d'expertise propres.

Etude de l'interaction et de l'usage

En accord avec de nombreux auteurs, la réalité virtuelle peut ainsi être envisagée comme un outil de conception permettant la prise en compte de l'usage du produit, lors des différentes phases de conception (Fischer & Troussier 2004; Sagot et al. 2005; Mahdjoub et al. 2010). Dans Mahdjoub (2007), la RV est utilisée pour **compléter l'utilisation des mannequins numériques** pour la conception de la fonction d'usage. Ceci est réalisée au-travers de l'étude du **système « Homme-réel, Produit-virtuel, Environnement-virtuel »** lors des phases d'études détaillées et d'optimisations du concept. Selon l'auteur, la RV contribue ainsi à résoudre le **paradoxe de l'ergonomie de conception** (présenté paragraphe 1.1.3), en optimisant la conception et l'évaluation du couple produit-usage dans le cas de produits nouveaux.



Figure 2-6. A gauche : simulation de l'usage à l'aide d'un mannequin numérique classique. A droite : visualisation immersive de la scène à l'aide de la réalité virtuelle. L'opérateur observe l'activité prédéfinie du mannequin numérique et reproduit les mouvements effectués par celui-ci (Mahdjoub 2007).



Figure 2-7. Tracking et représentation de la position de la main de l'opérateur dans l'EV (Bennes 2013).

La Figure 2-6 représente un exemple de l'intégration de la RV pour l'évaluation qualitative du produit virtuel. A gauche est représentée une évaluation ergonomique du concept virtuel réalisée à partir

d'une simulation par mannequin numérique classique. A droite, l'opératrice observe la scène (simulation avec le mannequin numérique) de façon immersive, et reproduit les mouvements du mannequin qu'elle observe, expérimentant ainsi l'activité scénarisée. Ici l'opérateur n'est pas en interaction (au sens strict) avec l'EV. Bien qu'immergé visuellement, celui-ci est donc toujours d'avantage spectateur qu'acteur de l'activité simulée. Pour une meilleure interaction avec le prototype virtuel, l'auteur propose un outil permettant de gérer la position et orientation du concept virtuel étudié. Cependant, l'implication de l'utilisateur reste limitée à cette manipulation, et l'interaction avec le produit virtuel est toujours réalisée d'un point de vue extérieur.

L'interaction reste ainsi définie du point de vue du concepteur (utilisateur en immersion), et non du point de vue du sujet (mannequin numérique). Nous pouvons faire le même constat dans d'autres travaux (Benne (2013) par exemple), où l'interaction de l'opérateur avec l'EV est toujours effectuée à partir des caractéristiques de celui-ci (Figure 2-7). Cette place du concepteur « **acteur extérieur** » et non « **acteur utilisateur** » est une des limitations des applications de réalité virtuelle existantes. Ces limitations seront présentées et discutées paragraphe 2.6.

2.5 La réalité virtuelle et la prise en compte du handicap

Traitement thérapeutique du handicap

La réalité virtuelle peut présenter des atouts dans la prise en charge du handicap. D'un point de vue humain, elle permet de proposer des exercices attractifs qui augmentent la motivation des participants à s'entraîner, à faire des efforts (Klinger 2008). Les travaux menés dans ce domaine depuis le début des années 90 montrent l'intérêt des environnements virtuels fonctionnels en rééducation cognitive. Les applications visent le traitement de nombreuses phobies, comme la peur de la hauteur, de l'agoraphobie, ou encore celle de l'avion (Sohlberg & Mateer 1989; Riva 2005). Dans l'idée d'utiliser la réalité virtuelle dans la prise en charge de handicaps, Klinger (2008) a développé un supermarché virtuel (VAP-S) dans lequel les participants remplissent une tâche (faire des courses suivant une liste imposée, payer et sortir). L'objectif de ces tests est l'évaluation de la planification de l'action afin de mesurer l'impact de l'altération due à une maladie neurodégénérative (maladie de Parkinson), avec, à long terme, l'amélioration ou la réhabilitation de la fonction cognitive.

Intégration du handicap dans la conception de produits

Au-delà d'une application directe sur l'utilisateur dans un but thérapeutique, certains travaux se sont intéressés à l'utilisation de la RV pour l'insertion de la prise en compte du handicap dans le processus de conception de produits. Nous pouvons par exemple citer les travaux de Goncalves (2014), permettant d'étudier l'accessibilité de nouveaux projets urbains et de rénovation des établissements recevant du public pour des personnes en fauteuil roulant. Un simulateur est présenté, utilisant conjointement une scène virtuelle, une plateforme à retour d'efforts, et un environnement de réalité virtuelle (Figure 2-8). L'objectif est d'aider les concepteurs à imaginer les contraintes de déplacements en fauteuils roulants dans une ville, dans un quartier, dans des immeubles etc., et ainsi proposer des configurations mieux adaptées à ce type de personne à mobilité réduite. Dans cette optique,

Baeulme et al. (2010a) étudient la réalité virtuelle immersive comme un support pour la réalisation d'un diagnostic de l'accessibilité d'un bâtiment en cours de conception. Les auteurs soulignent un gain de temps et d'efficacité dans la prise en compte des situations de handicaps, et la **pertinence de l'immersion sensorielle et motrice** dans le processus de conception des bâtiments



Figure 2-8. Utilisateur réel simulant un déplacement en fauteuil roulant dans l'environnement virtuel, et représentation d'un avatar virtuel.

Les limitations existantes des travaux de réalité virtuelle dans la conception centrée sur l'homme, et plus spécifiquement, dans la prise en compte du handicap, sont présentées dans le paragraphe suivant.

2.6 Limitations des approches existantes dans une démarche universelle

Comme présenté précédemment, les capacités d'immersion sensorielle et motrice fournies par la réalité virtuelle sont essentielles dans la conception de produits centrée sur l'homme, notamment au niveau de la simulation de l'usage et de l'activité de l'utilisateur. Cependant, certaines limitations peuvent être soulevées, notamment dans le contexte extrêmement spécifique de la conception universelle.

Un des principaux **verrous méthodologiques** que nous pouvons soulever est le **manque de prise en compte des caractéristiques spécifiques de l'utilisateur (mannequin numérique) dans l'interaction avec l'EV, et donc la simulation de l'activité et de l'usage.**

En effet, les travaux existants sont essentiellement basés sur une immersion visuelle du concepteur permettant une meilleure appropriation du concept virtuel étudié, mais sans fournir de possibilité d'interaction avec celui-ci. La réalité virtuelle permet alors le plus souvent une simple visualisation du produit. Certaines approches ont été développées pour permettre d'intégrer une interaction « physique » avec l'EV. Cependant, **l'interaction est toujours propre au concepteur immergé.** Dans Chitescu (2005), cette interaction est définie par le triptyque « Homme réel, Produit virtuel, Environnement virtuel ». Or, cet « Homme réel » est intrinsèquement l'opérateur en immersion. Ainsi, l'activité simulée est celle de l'opérateur, et non réellement celle de l'utilisateur. Il est évident que si ce sont les utilisateurs cibles qui réalisent les évaluations immersives, l'activité construite devient alors représentative. Cependant, une telle approche systématique pose des questions en termes de coûts d'investissement, spécialement dans le cas de produits devant satisfaire une grande

variété de capacités, comme dans une approche inclusive. Ce point sera discuté dans le paragraphe suivant.

Bien que centrées sur l'homme, les approches existantes ne permettent le plus souvent pas d'exploiter les avantages de la réalité virtuelle sur le point clé du problème : l'utilisateur (mannequin numérique). Cette spécificité induit que l'**expert métier** en immersion, bien qu'acteur de la conception, n'en reste pas moins, dans une certaine mesure, **spectateur de l'activité du mannequin**.

Dans Mahdjoub (2007) un mannequin numérique est intégré dans les simulations par réalité virtuelle, mais celui-ci reste observé d'un point de vue extérieur par le concepteur, ne réalisant qu'une reproduction mimétique des gestes visualisés. Certains travaux ont développé des simulations permettant de se mettre « dans la peau » de l'utilisateur, par le biais d'une vue immersive à la première personne. Cependant dans ce cas, seul le point de vue est simulé, et l'interaction est alors soit inexistante, soit encore une fois propre au concepteur immergé. Il existe donc un réel manque pour les concepteurs à **se mettre à la place du mannequin numérique** (utilisateur), pour évaluer interactivement et de manière objective et subjective le produit. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas d'utilisateurs cibles ayant des capacités physiques spécifiques, comme dans une approche inclusive.

En effet, les spécificités physiques des personnes déficientes engendrent des contraintes supplémentaires dans la prise en compte de l'usage et de l'activité souhaitée. Une interaction immersive « spectateur » par rapport au mannequin ne peut par exemple pas permettre une prise en compte efficace des **stratégies de compensation mises en œuvre** par l'utilisateur en situation de handicap. La simulation et l'anticipation de l'activité future peuvent dans ce cas être très différentes de celles qu'elles seraient en réalité. Nous pouvons ainsi soulever un manque dans la modélisation et l'anticipation de l'impact des limitations physiques sur l'activité de l'utilisateur, et donc sur l'usage du produit associé. Ceci est résumé d'un point de vue plus global par le **manque d'une méthodologie permettant d'intégrer efficacement les capacités physiques particulières des personnes en situation de handicap dans les simulations immersives**. D'ailleurs selon Baeulme et al. (2010b), bien que la réalité virtuelle, du fait de ses capacités d'immersion sensorielle et motrice, montre toute sa pertinence dans le processus de conception, son utilisation pour l'intégration des aspects liés aux situations de handicaps n'en est encore qu'à ses prémises.

Un intérêt fort de la réalité virtuelle est de permettre une meilleure analyse qualitative et subjective du besoin, de par les capacités d'immersions motrices et sensorielles fournies. Or, peu de travaux se sont penchés sur la nécessité pour les concepteurs (et spécifiquement l'ergonome) de disposer d'outils directement intégrés aux outils de RV pour pouvoir analyser l'activité future de l'utilisateur. Mahdjoub (2007) propose d'intégrer des outils d'évaluations ergonomiques en réalité virtuelle. Cependant, comme la plupart des études présentes dans la littérature, l'approche proposée est essentiellement normative, c.à.d. basées sur des normes ergonomiques prédéfinies. Les contraintes biomécaniques étudiées sont alors représentatives d'une personne « idéale » ne souffrant d'aucune limitation physique particulière. Or, dans le cas de personnes ayant des limitations fonctionnelles spécifiques, ces évaluations ne sont plus consistantes, et dépendent des déficiences étudiées. De plus, comme énoncé précédemment, ces évaluations sont basées sur l'interaction de l'opérateur avec l'EV, et non sur les caractéristiques spécifiques du mannequin numérique (et donc de

l'utilisateur). Il existe donc un réel **manque d'outils permettant d'analyser et d'anticiper l'activité de personnes ayant des déficiences physiques dans l'EV.**

Enfin, de nombreuses applications utilisant la réalité virtuelle dans la conception de produits centrés sur l'homme (comme celles présentées dans Mahdjoub (2007) et Bennes (2013)) sont basées sur des cas d'usages particuliers, dans un contexte spécifique, et pour un utilisateur bien défini. Très peu de travaux traitent d'études de cas où le produit final doit répondre aux attentes et exigences d'un large spectre de personnes, comme dans le cas d'une conception pour tous. Il y a donc également un manque d'une définition d'une méthodologie globale utilisant l'apport des outils de la réalité virtuelle dans une démarche de conception inclusive.

2.7 Conclusion

Dans les paragraphes 1 et 2, nous avons présenté les notions essentielles liées à notre sujet de recherche. Nous avons tout d'abord souligné les enjeux liés à l'intégration de l'utilisateur final dans la conception de produits centrés sur l'homme. Nous nous sommes particulièrement intéressés au domaine spécifique de la conception universelle ainsi qu'à la prise en compte du facteur humain par les acteurs de la conception (concepteurs, ergonomes, etc.). Dans ce cadre, nous avons vu que la réalité virtuelle pouvait permettre de supporter les concepteurs dans le développement de produits anthropocentrés. L'interactivité entre l'homme et le système fourni par ces outils permet en effet de soutenir l'évaluation du produit et de son usage, au plus tôt du processus de conception. Cependant, nous avons mis en avant les limitations des approches existantes dans une démarche universelle. Celles-ci concernant notamment la simulation et l'intégration des caractéristiques des personnes à besoins spécifiques (personnes en situations de handicaps, seniors, etc.) dans le processus de conception.

Partant des constats réalisés dans cet état de l'art, nous proposons dans les sections suivantes (paragraphes 3 et 4) de présenter notre problématique de recherche et de positionner plus précisément nos travaux de thèse.

3 Problématique de recherche

Problématique globale de recherche

Au vue des limitations présentes dans la littérature, et dans le cadre de nos travaux de recherche, nous proposons de soulever le double questionnement global suivant :

Comment la réalité virtuelle peut-elle favoriser l'intégration des besoins, attentes, et caractéristiques spécifiques des personnes présentant des déficiences physiques au cœur du processus de conception ?

Comment peut-elle soutenir les concepteurs (designers, ergonomes, etc.) à mieux comprendre, simuler, et anticiper l'impact de déficiences sur l'activité du sujet, et ainsi mieux construire le produit et son usage?

Approche de recherche

Sur la base des apports et limites issus de différents travaux dans le domaine de la conception centrée sur l'homme (Porter et al. 2004; Mahdjoub 2007; Marshall et al. 2010; Bennes 2013; Kirisci et al. 2012), nous envisageons de positionner notre recherche sur ***l'utilisation conjointe des mannequins numériques et de la réalité virtuelle pour une meilleure prise en compte des caractéristiques et capacités humaines dans le processus de conception.***

Dans le cadre d'une démarche de conception *pour tous*, notre recherche vise ici plus spécifiquement l'intégration des caractéristiques spécifiques des personnes en situations de handicap, des personnes âgées, et des personnes à mobilité réduite en général. En effet, de nombreux travaux en conception universelle ou en conception dite spécifique se concentrent sur la prise en compte des personnes en fauteuil roulant, excluant ainsi tous les autres types de déficiences et limitations, pourtant majoritaires. Il s'agit en particulier d'aider les acteurs de la conception durant les différentes phases du processus pour leur permettre d'évaluer, et proposer des concepts répondant le mieux aux attentes et besoins spécifiques des utilisateurs.

Nous nous intéressons ici essentiellement à des problèmes de conception basés sur des environnements (postes de travail, aménagements intérieurs, postes de conduite, etc.). Nous n'étudions donc pas la conception de « petits produits » tels que des téléphones ou des appareils ménagers par exemple. Ainsi, notre axe d'étude sera orienté vers les notions clés d'accessibilité, d'atteintes, de vision, de postures, ou encore de comportements. Nous canalisons donc nos travaux au travers du prisme des activités physiques de l'utilisateur, nous amenant notamment à des considérations en termes d'ergonomie. Nous nous intéressons ici à la composante physique de l'ergonomie, et aux aspects anthropométriques et biomécaniques. Les aspects cognitifs, bien que présents par le biais de l'approche choisie, seront discutés sans faire l'objet d'un développement spécifique. Les aspects d'ergonomie organisationnelle ne seront pas traités.

Ces considérations ergonomiques sont classiquement basées (en dehors des méthodes d'observations réelles), sur la définition des activités posturales et comportementales des

mannequins numériques. Or, comme précisé dans le paragraphe 1.3, les méthodes classiquement utilisées pour définir la configuration du mannequin peuvent présenter des limites quant au réalisme des postures et gestes adoptés. Ceci est particulièrement vrai pour des environnements à topologie complexes, où les postures adoptées peuvent être très spécifiques. Nous pensons qu'il est donc important de permettre aux concepteurs d'effectuer ces analyses à partir d'une définition comportementale du mannequin plus réaliste, naturelle, et intuitive. Nous pensons ainsi que la réalité virtuelle, de par ses capacités d'interactivités, peut aider à répondre à cette problématique. L'objectif est dans ce cas de pouvoir limiter les problèmes d'usages liés à une mauvaise simulation et analyse des contraintes du mannequin numérique.

Continuant dans cette optique, nous proposons ici une démarche centrée sur l'appropriation et l'expérimentation de l'usage par les concepteurs. En effet, plusieurs travaux ont souligné l'intérêt de la réalité virtuelle dans la simulation et la projection de l'activité future de l'utilisateur par les concepteurs. Cependant, comme évoqué précédemment, l'activité simulée est alors celle de l'opérateur en immersion et non celle de l'utilisateur cible. La vision de nos travaux de recherche est de permettre à l'expert métier d'être positionné au plus près de l'analyse, c'est-à-dire à la place de l'utilisateur. Il passe ainsi d'un statut de spectateur de l'activité du mannequin, à celui « **d'acteur représentatif** » de l'utilisateur.

Enfin, comme présenté Section 1.2.3, deux approches concourantes sont adoptées en conception centrée sur l'homme (et en conception pour tous) pour l'intégration du facteur humain dans la conception, à savoir, l'expertise par le biais d'acteurs de la conception (experts métier notamment), et par la participation active des utilisateurs. Le constat est fait que l'implication directe des utilisateurs finaux, bien qu'essentielle, n'est pas toujours aisée à appliquer (difficulté en termes de techniques, de temps, d'argent, etc.), et est donc le plus souvent réalisée ponctuellement dans le processus de conception. De plus, des questions se posent encore sur l'utilisabilité et l'adaptation des applications de réalité virtuelle aux personnes en situation de handicap. Sans remettre en question le rôle fondamental de la participation directe des utilisateurs dans la conception, nous pensons qu'une optimisation de l'intégration du facteur humain doit avant tout passer par la définition d'outils et de méthodologies permettant de soutenir les concepteurs dans l'intégration et la simulation des caractéristiques de l'utilisateur. Notre approche de recherche se concentre donc en ce sens, pour tenter d'optimiser les évaluations et les analyses effectuées par les acteurs de la conception entre les phases de participation des utilisateurs.

4 Positionnement

Notre premier axe de recherche se concentre sur l'optimisation de la définition des comportements du mannequin numérique, ainsi que sur le positionnement du concepteur au centre du processus d'évaluation. Nous proposons de définir une méthodologie permettant de permettre aux concepteurs d'effectuer des évaluations virtuelles non plus en tant que spectateur de l'activité du mannequin, mais en tant qu'acteur représentatif, en interagissant directement dans la peau de celui-ci. Nous proposons ainsi une approche originale permettant de passer d'un système « Homme réel, Produit virtuel, Environnement virtuel » (comme défini dans Chitescu et al. (2003)), à un **système « Homme réel, Homme virtuel, Produit virtuel, Environnement virtuel »**.

Les objectifs d'une telle approche sont multiples :

1. optimiser la prise en compte du comportement des utilisateurs pour une simulation plus naturelle et réaliste des postures et gestes adoptés par le mannequin, lors des simulations numériques ;
2. mieux intégrer l'utilisateur au cœur du processus de conception et aider les concepteurs à se mettre à la place de l'utilisateur ;
3. permettre une évaluation interactive du concept étudié pour de multiples caractéristiques anthropométriques, sans besoin de faire physiquement appel aux utilisateurs.

L'approche méthodologique est donc fondée sur l'utilisation conjointe des mannequins numériques et de la RV. Elle est schématiquement représentée Figure 4-1. Les mannequins sont utilisés pour représenter les caractéristiques anthropométriques des utilisateurs finaux. Le concepteur (opérateur) interagit en temps réel dans la peau de ces mannequins par le biais d'interfaces de réalité virtuelle.

A noter que cette démarche est basée sur une hypothèse importante, à savoir que **le concepteur en immersion doit être en pleine possession de ses capacités physiques et cognitives**. En effet, une déficience fonctionnelle ou cognitive pourrait avoir une influence sur le comportement du mannequin virtuel et donc sur l'évaluation ergonomique. *L'impact de déficiences sur l'interaction avec le monde virtuel sera traité dans le chapitre IV.*

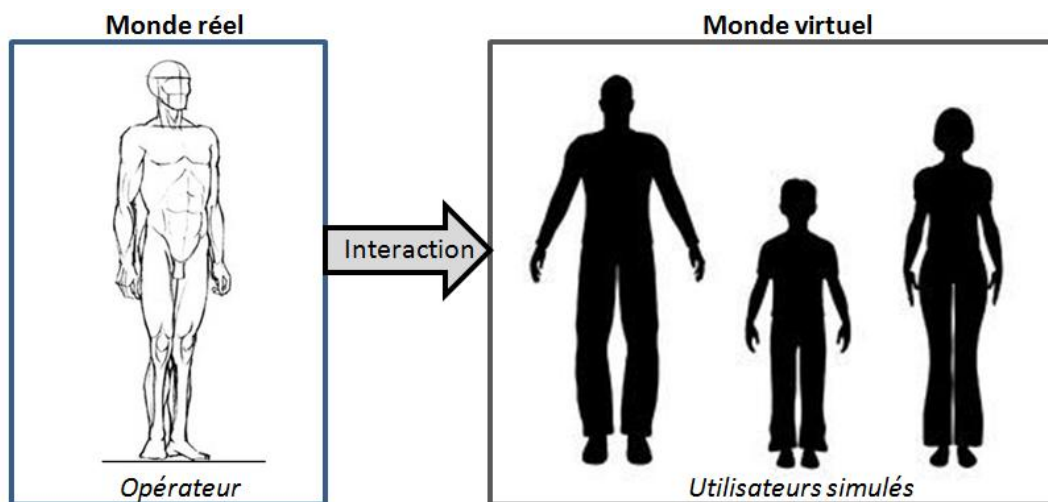


Figure 4-1. Représentation schématique de l'approche proposée.

Pour valider la fiabilité de cette approche, nous proposons dans le chapitre suivant une étude comparative (Figure 4-2), basée sur l'évaluation de l'accessibilité (atteinte) d'un panel d'individu. En effet, les capacités d'atteintes d'un individu, en plus d'être un point d'étude important pour la conception ergonomique de produits et d'environnement, intègrent des données à la fois liées aux caractéristiques dimensionnelles et comportementales du sujet. Ainsi, ceci constitue un facteur intéressant pour l'étude et la modélisation des gestes et postures des utilisateurs. La méthodologie proposée sera ainsi comparée avec d'autres méthodes d'analyses classiquement utilisées dans l'industrie.

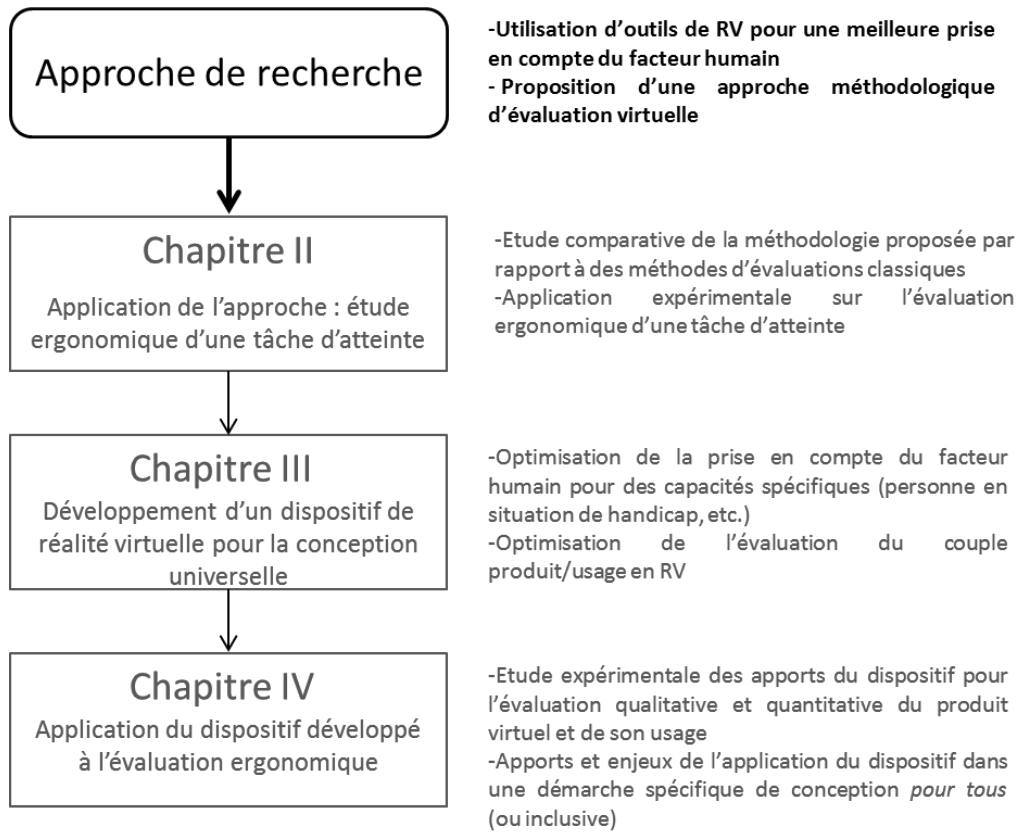


Figure 4-2. Représentation globale de la structure du manuscrit.

Chapitre II

Outils de réalité virtuelle pour l'évaluation ergonomique de produits: étude d'une tâche d'atteinte

5 Etude comparative expérimentale

5.1 Introduction

Ce chapitre propose l'application de la démarche présentée ci-avant dans l'étude de l'accessibilité d'un environnement. L'objectif est d'enrichir les outils numériques existants par le biais de systèmes interactifs, pour permettre une simulation comportementale virtuelle plus réaliste. La méthodologie est basée sur des modèles de mannequins numériques déjà existants. De nombreux mannequins et logiciels de modélisation anthropométrique sont disponibles sur le marché, chacun avec des caractéristiques et fonctionnalités très différentes (Delangle & Poirson 2013a; Delangle & Poirson 2013b).

Nous avons proposé dans ce cadre une étude comparative objective des principaux outils de modélisation humaine disponibles sur le marché. L'objectif étant de pouvoir conseiller, en fonction des attentes des concepteurs, le logiciel répondant le mieux à leurs besoins. **Cette étude est présentée Annexe A.**

Pour des questions techniques et logistiques, il ne nous est pas possible d'utiliser ici les différents logiciels de modélisation existants. Partant des données présentées en Annexe A et des outils disponibles, nous avons choisi d'utiliser le mannequin du logiciel de modélisation CATIAV5 (ou plus précisément DelmiaV5 qui est la version de modélisation humaine associée à ce logiciel). Ce logiciel est largement présent dans le milieu industriel, et notamment dans les domaines de la marine, de l'automobile ou de l'ingénierie aérospatiale, reconnus comme porteurs standards pour le développement de produit virtuel. Ce choix s'inscrit donc dans une représentation cohérente des pratiques industrielles actuelles dans le domaine de la simulation numérique. De plus, contrairement à d'autres logiciels de modélisation, Delmiav5 est couplé au logiciel de CAO CatiaV5 permettant de construire l'environnement virtuel et d'y intégrer le mannequin numérique sous un même environnement de travail (pas de nécessité de transfert d'informations).

L'intérêt de la méthode présentée précédemment est de pouvoir réaliser des évaluations sans faire physiquement appel à tout un panel d'utilisateurs. Cependant, il est nécessaire de valider la robustesse de cette approche dans le cadre d'évaluations ergonomiques. Pour cela, nous proposons de mettre en place une **expérimentation basée sur l'évaluation d'une tâche d'atteinte**. Ainsi les résultats obtenus expérimentalement avec ceux obtenus par notre méthode pourront être comparés. La seconde hypothèse est que les outils d'interaction peuvent enrichir les modèles de comportement et de prédiction d'atteinte des mannequins numériques. Pour vérifier cette idée dans le cadre de cette étude, nous proposons également de réaliser l'évaluation par le biais de mannequins virtuels seuls. De nombreux modèles de mannequins fournissent des évaluations ergonomiques basées sur des données structurelles, mais également sur des considérations biomécaniques du corps humain. Ces données auront par exemple fonction de prendre en compte les facteurs pouvant affecter les capacités d'atteinte du mannequin, comme la mobilité de l'épaule ou de la colonne vertébrale (Chaffin 2002). Pour analyser les variables effectivement prises en compte lors de l'évaluation de l'atteinte, nous proposons également de comparer les analyses avec

un modèle purement statique ne prenant en compte que des données structurales, et non biomécaniques ou comportementales.

Ainsi, nous proposons une étude comparative de l'évaluation d'une tâche d'atteinte par le biais de quatre approches différentes (Figure 5-1). Premièrement, une évaluation d'atteinte est menée expérimentalement par un groupe d'utilisateurs tests. Ces résultats sont considérés comme "référence" pour l'étude comparative. Ensuite, les caractéristiques anthropométriques de ces utilisateurs sont utilisées pour évaluer l'atteinte, utilisant:

- un modèle statique, exclusivement basé sur les caractéristiques anthropométriques statiques des sujets (approche 2a) ;
- une simulation par mannequin numérique, et outils ergonomiques associés (approche 2b);
- la méthodologie proposée basée sur une simulation par mannequin numérique couplé à des dispositifs d'interactions (approche 2c).

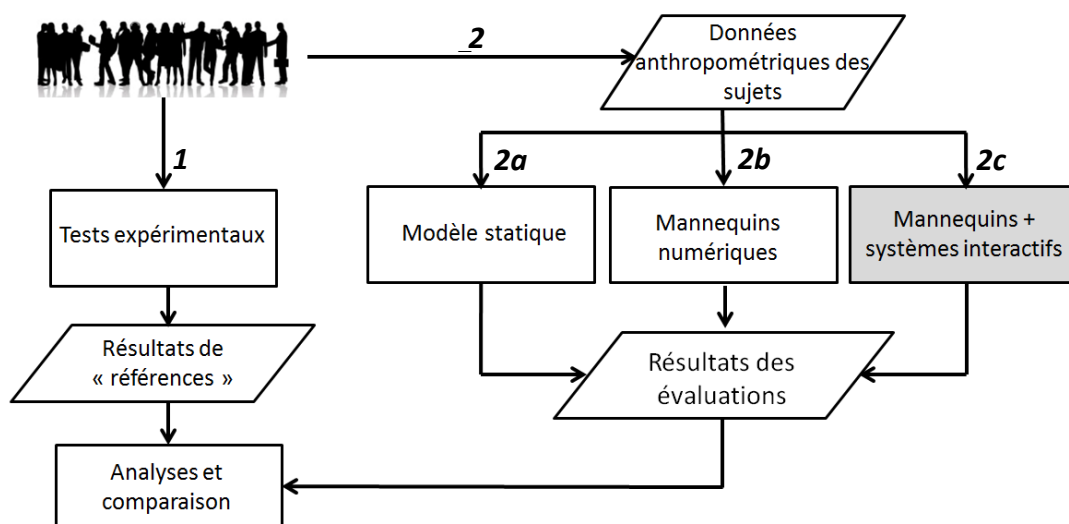


Figure 5-1. Vue d'ensemble des quatre approches utilisées dans l'étude comparative.

5.2 Matériels et méthodes

5.2.1 Approche 2a : modèle statique

Le modèle statique permet de définir l'enveloppe d'atteinte d'un sujet uniquement à partir de ses caractéristiques anthropométriques externes, comme celles classiquement disponibles dans les bases de données anthropométriques. Ceci fait référence aux modèles de mannequin en deux dimensions, originellement utilisés pour représenter de façon statique les caractéristiques d'un individu (Tilley et al. 2002). Les caractéristiques biomécaniques et comportementales ne sont donc ici pas prises en compte. Ainsi, le bras est considéré comme une simple chaîne cinématique définie par ses dimensions (main, avant-bras, et bras). Le mouvement du bras est défini par une liaison pivot au niveau de l'épaule. L'enveloppe d'atteinte maximale a alors été modélisée par un arc de cercle, avec un rayon correspondant à la longueur du bras, et le point de rotation correspondant à la position de

l'épaule (Figure 5-2). H représente l'extrémité de la main (bout des doigts), S la position de l'épaule, et O le point de symétrie du corps sur l'axe horizontal des bras. OS représente donc une demi-largeur d'épaule et SH la longueur de bras.

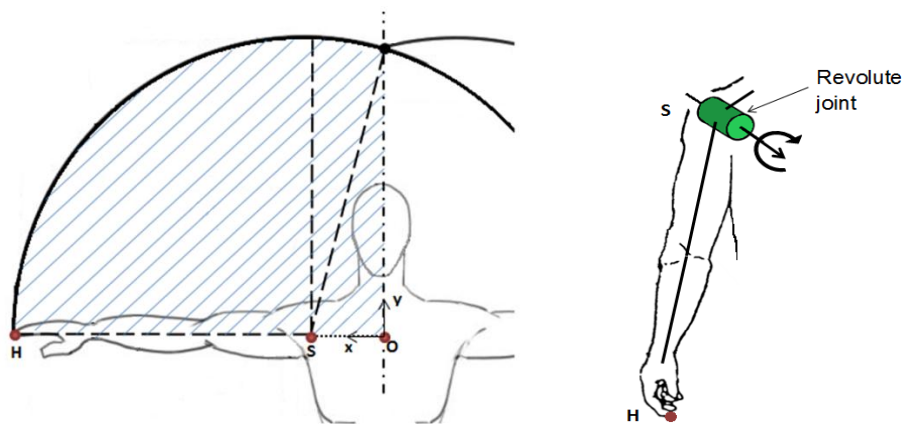


Figure 5-2. A gauche : modèle statique définissant l'atteinte maximale du bras (zone hachurée). A droite : représentation cinématique du bras associée au modèle.

5.2.2 Approche 2b : mannequins numériques

Un grand nombre de domaines de l'ingénierie utilisent des simulations numériques en 3D pour prédire l'accessibilité d'un environnement, allant de l'automobile (Chaffin 2001; Hanson & Högberg 2008; Yang & Abdel-Malek 2009), à la conception d'environnements inclusifs (Marshall et al. 2010; Porter et al. 2004). Typiquement, l'amplitude (enveloppe) d'atteinte est obtenue par itération de chaque articulation du haut du corps du mannequin virtuel, partant de l'articulation sternoclaviculaire jusqu'au poignet. L'enveloppe définissant tous les points pouvant théoriquement être atteints par le sujet peut alors être définie et représentée en 3D (Abdel-Malek et al. 2001). Le modèle défini par le logiciel DelmiaV5 est utilisé pour évaluer l'accessibilité de l'EV. L'enveloppe d'atteinte maximale est cinématiquement créée autour de l'articulation de l'épaule et générée en 3D par le mannequin (Figure 5-3). L'environnement de travail de CatiaV5 est utilisé pour recréer virtuellement les paramètres dimensionnels réels de l'environnement à évaluer.

À noter que plusieurs enveloppes d'atteintes peuvent être créées à partir du modèle cinématique du mannequin, à savoir l'enveloppe d'atteinte « idéale », « physiologiquement maximale », et « étendue » (Dassault-Systemes 2000) (Figure 5-3). La première représente l'atteinte optimale permettant au mannequin (utilisateur) d'effectuer des mouvements tout en restant dans une zone de travail confortable. Celle-ci est donc assez réduite due aux limites articulaires imposées (bras limité à 45 degrés de flexion et d'abduction, à 60 degrés de rotation latérale, et avant-bras limité à 90 degrés en flexion). La seconde représente l'enveloppe de portée physiologiquement admissible, c'est à dire les 90% du maximum de portée du bras. En effet, l'enveloppe maximale (100%) est réduite de 10% pour prendre en compte la non extension complète de toutes les articulations. De plus, la rotation latérale du bras est limitée à 90 degrés. L'enveloppe d'atteinte étendue est définie par l'enveloppe d'atteinte maximale physiologiquement admissible (100%) et prend en compte le mouvement du haut du corps (tronc).

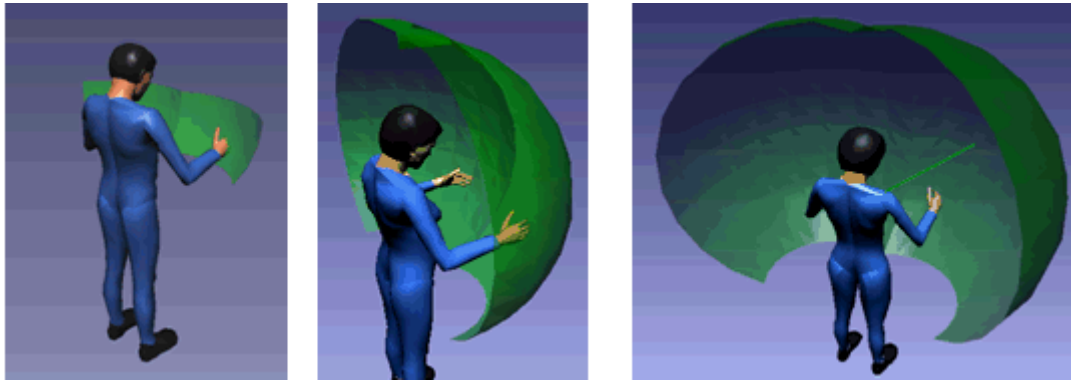


Figure 5-3. Représentation graphique de l'enveloppe d'atteinte « idéale » (gauche), « maximale » (centre), et « étendue » (droite) définies à partir du modèle cinématique du mannequin numérique.

5.2.3 Approche 2c : mannequin numérique + systèmes interactifs

La méthode d'évaluation de l'atteinte proposée utilise un dispositif de capture de mouvement en plus du logiciel de CAO CATIAV5 pour contrôler physiquement le mannequin numérique dans la scène virtuelle. L'évaluation est ainsi basée sur les mouvements effectués par le concepteur interagissant en temps réel avec l'environnement virtuel, en contrôlant les mannequins virtuels avec différentes anthropométries. Le protocole mis en place permettant de coupler en temps réel les mouvements du concepteur et des mannequins est schématiquement représenté Figure 5-4, et détaillé ci-après.

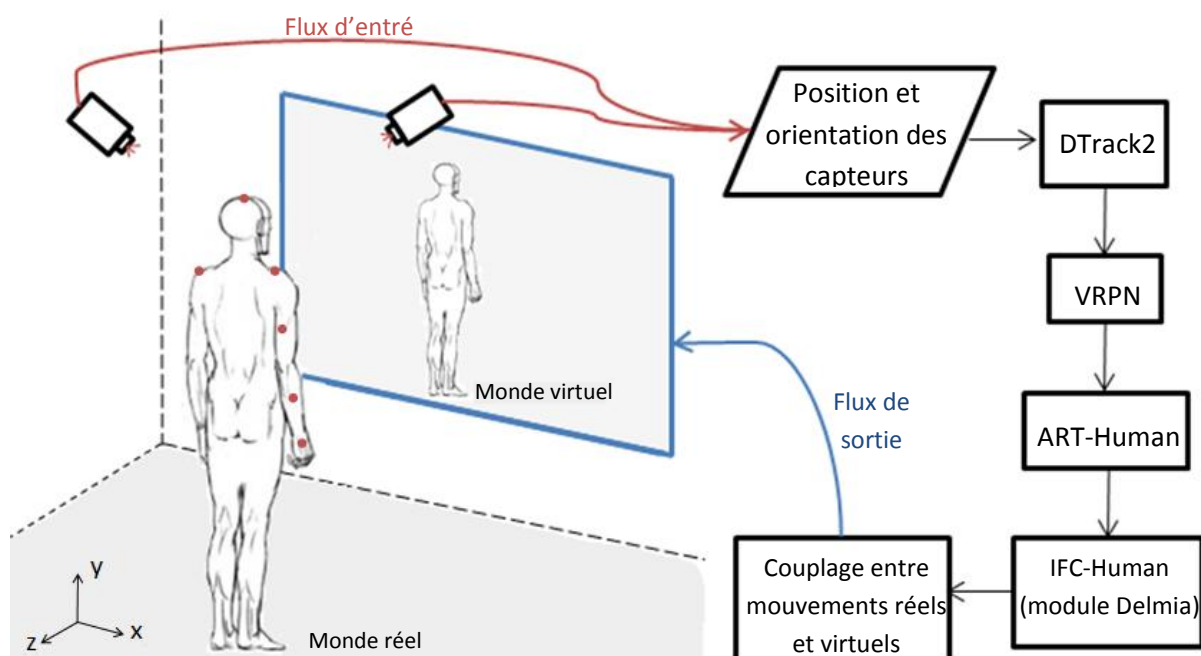


Figure 5-4. Protocole permettant de coupler les mouvements du concepteur à celui du mannequin numérique (incluant les différents logiciels et dispositifs).

Le concepteur est muni de capteurs positionnés sur le corps et placé dans un environnement entouré de caméras permettant de capturer les mouvements de ses membres (position et orientation dans

l'espace). Au total, huit caméras sont utilisées, évitant les phénomènes d'occultation de certains marqueurs. Les données sont reçues en temps réel sous forme de flux par le logiciel Dtrack2 v2.8.1 à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz.

Ce flux est ensuite récupéré par le protocole d'échange de données VRPN (Virtual-Reality Peripheral Network), une interface transparente agissant comme un serveur entre une application de réalité virtuelle tournant sur une machine, et des dispositifs physiques (capture de mouvement) connectés à d'autres machines d'un réseau. Cela permet à l'application ART-Human de lire le flux de données. Ces données sont ensuite traitées par le module « IFC-humain » du logiciel DELMIAV5, permettant de coupler les mouvements du mannequin numérique à celui du concepteur. Un écran stéréoscopique placé devant celui-ci permet de l'informer en temps réel (avec un point de vue à la troisième personne) du comportement du mannequin dans la scène virtuelle (Figure 5-5).



Figure 5-5. *A gauche : le concepteur en immersion portant le dispositif de capture de mouvement optique. A droite : le mannequin numérique de DELMIAV5 affiché sur l'écran stéréoscopique situé devant le concepteur.*

Une fois le couplage réalisé, le concepteur en immersion peut évaluer l'accessibilité de l'environnement pour chaque mannequin représentatif (en terme d'anthropométrie) de l'utilisateur cible. Le processus global d'évaluation, allant de la création de l'environnement virtuel aux résultats des analyses, est défini par les 5 étapes Figure 5-6.

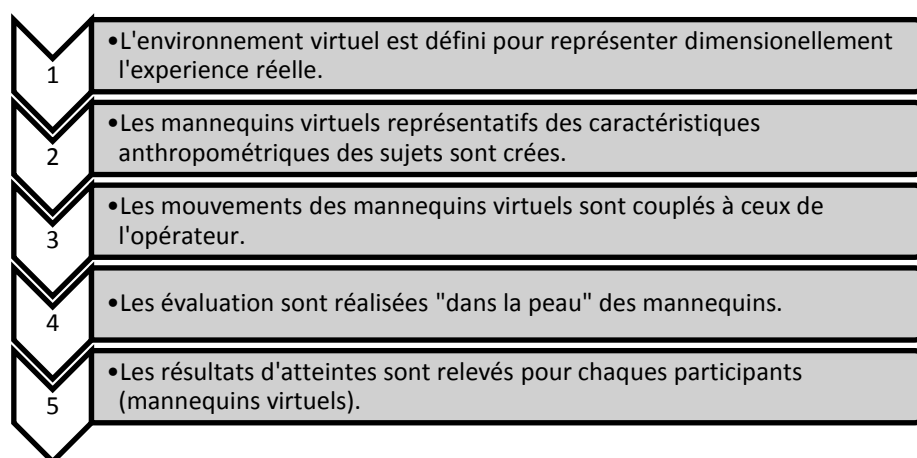


Figure 5-6. *Les 5 étapes du processus d'évaluation de l'EV.*

5.3 Application expérimentale

5.3.1 Expérience

Sujets tests

Quarante participants (vingt-cinq hommes et quinze femmes), tous adultes volontaires, ont participé à l'étude, couvrant un large éventail de caractéristiques anthropométriques (de 1.48 m à 1.93 m pour la stature). La moyenne (et écart type SD) de la stature des sujets était de 1735 mm (SD : 95,4). Aucun participant ne souffrait de déficiences ou limites physiologiques particulières. Cet échantillon d'utilisateurs est considéré comme représentatif d'une population adulte moyenne. Ce fut une décision délibérée de ne pas inclure, dans un premier temps, des personnes présentant des caractéristiques physiques "spécifiques" (personne âgée par exemple). Des déficiences particulières pouvant avoir un impact direct sur les capacités fonctionnelles, la comparaison de l'atteinte obtenue par les différentes méthodes pourrait être moins objective.

Evaluation expérimentale

L'étude proposée consiste à l'évaluation d'une tâche d'atteinte principalement localisée sur le plan frontal de l'utilisateur, c'est-à-dire essentiellement en 2D. Le test expérimental a pour but d'être représentatif d'un problème d'accessibilité standard (atteinte d'un bouton d'arrêt d'urgence sur un poste de travail ou d'un élément sur une étagère par exemple). Cependant, le problème a été délibérément défini comme étant en 2D, et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, le modèle statique est intrinsèquement défini en 2D. Ainsi, si nous voulons étudier objectivement les modèles d'atteinte du mannequin numérique, ceci implique de définir une démarche comparative qui ne soit pas basée sur une évaluation en 3D. De plus, la définition directe d'une tâche multidimensionnelle complexe pourrait engendrer un nombre important de différences, avec des causes potentiellement difficiles à identifier. Ainsi, **l'étude expérimentale est définie par des tâches d'atteintes et un protocole simples, permettant de mettre plus facilement en évidence les éléments de l'étude comparative.** C'est pourquoi nous étudions ici l'enveloppe d'atteinte maximale des sujets permettant de mettre en avant les facteurs biomécaniques et comportementaux (contrairement à l'atteinte de confort pouvant inclure des données subjectives). L'expérience mise en place est présentée ci-après.



Figure 5-7. Test d'atteinte : le participant touche le maximum de points situés sur la structure, tout en gardant les pieds fixe par rapport au sol.

L'atteinte fonctionnelle est quantifiée en étudiant l'interaction entre les utilisateurs tests et une structure physique (Kennedy 1978; Faulkner & Day 1970). Pour donner une cible à l'utilisateur, nous avons conçu une tâche avec des points d'intérêts physiques (interrupteurs électriques). Au total, 168 points de mesure sont disposés sur la structure positionnée au niveau de l'axe frontal des participants (Figure 5-7). Les points sont indiqués par couleurs permettant une meilleure identification au cours du test. Ceux-ci sont positionnés de manière asymétrique de part et d'autre de l'axe central de la plaque, de sorte à optimiser la répartition sur l'infrastructure (augmenter l'échantillonnage spatial sans augmenter le nombre d'interrupteurs). Ainsi, les points situés à gauche et à droite sont complémentaires, et peuvent être mentalement repositionnés sur un même côté (Figure 5-8). Nous faisons l'hypothèse à ce niveau que les capacités d'atteintes à droite et à gauche des sujets sont similaires (atteinte symétrique). *Cette particularité sera utilisée paragraphe 5.4.2, pour la reconstruction numérique des profils d'atteintes.*

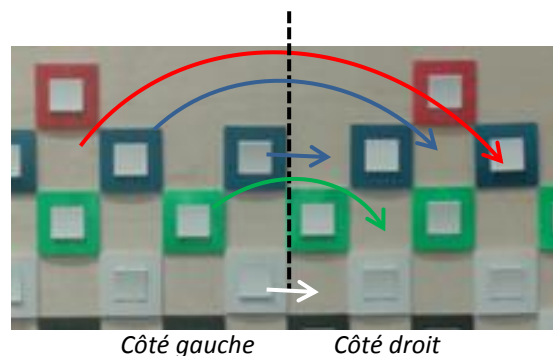


Figure 5-8. Principe de la localisation des points. Pour augmenter la répartition sur l'infrastructure, les points des côtés droit et gauche ne sont pas symétriques.

La structure (plaque), positionnée sur un mur, est réglable en hauteur à l'aide de deux axes verticaux. Ceci permet un positionnement précis de celle-ci à hauteur d'épaule du participant. La plupart des données anthropométriques figurant dans les bases de données représentant des mesures de corps nus -et pour permettre une comparaison fiable-, les expériences sont réalisées avec des vêtements légers.

Pour limiter le nombre de paramètres liés aux déplacements du sujet (ne pouvant pas ou difficilement être pris en compte par le modèle statique et numérique), nous avons posé les limitations suivantes. Les participants avaient la consigne de «toucher autant de points que possibles en gardant les pieds fixes par terre». Les participants étaient ainsi placés au centre de la plaque avec les pieds fixes par rapport au sol, évitant que ceux-ci ne lèvent leurs pieds pour augmenter leur portée verticale. Ceci était vérifié en temps réel à l'aide de capteurs de position, placés sous les talons du sujet. Cette situation est représentative de la portée fonctionnelle, c'est-à-dire la distance maximale que peut atteindre un individu en position debout, en maintenant une base fixe (Duncan et al. 1992; Duncan et al. 1990). Pour chaque participant, les points atteints ont été identifiés et notés afin de reconstruire l'enveloppe d'atteinte.

5.3.2 Evaluations

Les méthodologies présentées ci-avant sont appliquées pour réaliser l'évaluation liée à la tâche d'atteinte expérimentale définie.

5.3.2.1 Création d'une base de données anthropométrique commune

Lors d'évaluations ergonomiques, les caractéristiques anthropométriques des utilisateurs cibles peuvent être modélisées soit à partir des caractéristiques réelles de ceux-ci, soit à partir de données statistiques (bases de données). Afin de limiter les biais statistiques dans la comparaison, les évaluations sont réalisées en intégrant les caractéristiques anthropométriques des sujets ayant participé aux tests expérimentaux (Figure 5-9). Les données dimensionnelles statiques ont donc été relevées pour chacun des participants, créant une base de données anthropométrique de référence. Un mètre ruban a été utilisé pour mesurer la longueur des bras (Johanson & Astrom 2004) correspondant à la distance entre l'acromion de l'épaule et le bout des doigts), ainsi que pour la largeur des épaules (distance entre les deux acromions). Une toise a également été utilisée pour mesurer la stature et la hauteur d'épaule. Les données sont mesurées pour les 40 participants, dans le but de fournir les données pour permettre la comparaison des évaluations.

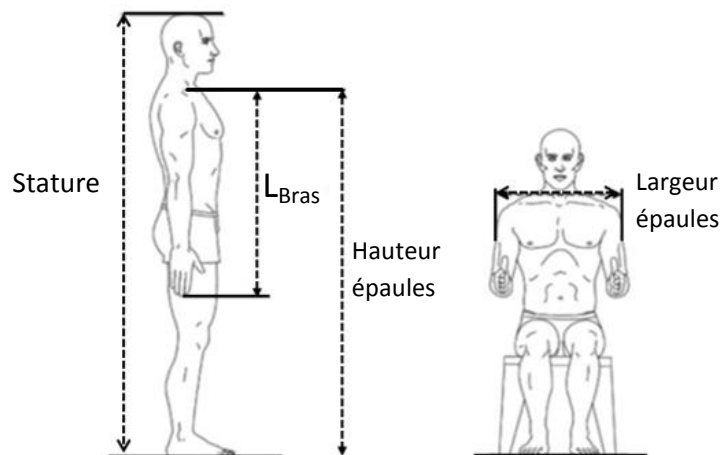


Figure 5-9. Données dimensionnelles mesurées sur chaque participant.

5.3.2.2 Approche 2a : modèle statique

Le modèle statique (défini paragraphe 5.2.1) est utilisé pour définir les points atteints pour chaque sujet. Tous les points situés à l'intérieur de l'enveloppe (autrement dit la zone hachurée représentée Figure 5-2), sont considérés comme atteints. Les points en dehors sont logiquement considérés comme non atteint. Les points situés en bordure de l'enveloppe sont considérés comme atteint à partir du moment où le profil touche la zone concernée, comme présenté Figure 5-10. Ceci correspond au mieux à l'approche expérimentale, où un point sera considéré comme atteint, à partir du moment où le sujet enclenche l'interrupteur, même du bout des doigts.

Ainsi, connaissant les coordonnées des points sur l'infrastructure, et les caractéristiques anthropométriques des individus, un programme a été réalisé permettant de déterminer automatiquement les points atteints ou non.

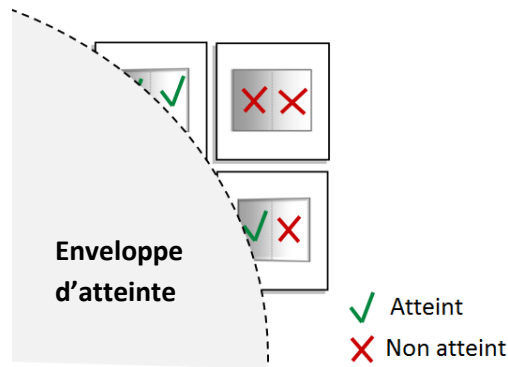


Figure 5-10. Schéma de principe définissant les points atteints en bordure d'enveloppe.

5.3.2.3 Approche 2b : mannequins numériques

Les caractéristiques dimensionnelles de l'étude ainsi que les contraintes expérimentales ont été fidèlement modélisées à l'aide du logiciel CatiaV5. Chaque participant est représenté par un mannequin numérique défini à partir de ses caractéristiques anthropométriques (Figure 5-11). Au total, 40 mannequins numériques ont été ainsi modélisés, représentant le panel d'utilisateur test. Les mannequins sont positionnés, base fixe, devant la plaque, au même endroit que les utilisateurs lors des tests expérimentaux. L'enveloppe d'atteinte "étendue" (maximale physiologiquement admissible représenté Figure 5-3) générée par le mannequin, est utilisée pour définir les points atteints ou non pour chaque participant (Figure 5-12).

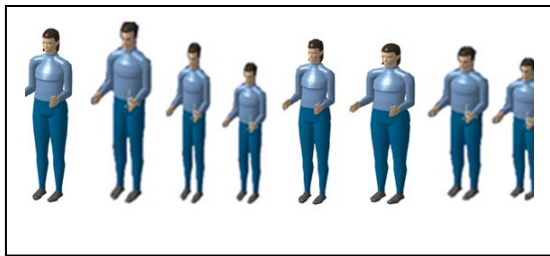


Figure 5-11. Mannequins virtuels avec différents anthropométries représentant les utilisateurs finaux.

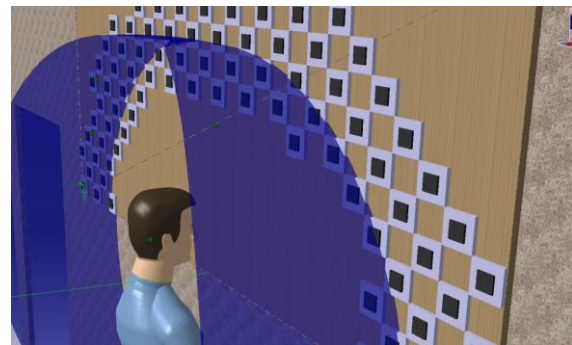


Figure 5-12. Evaluation de l'atteinte à partir de l'enveloppe maximale automatiquement générée par le mannequin virtuel.

5.3.2.4 Approche 2c : mannequin numérique + capture de mouvement

L'environnement virtuel ainsi que les mannequins numériques définis précédemment sont utilisés pour l'évaluation. Le concepteur en immersion évalue l'accessibilité des différents points de l'infrastructure en interagissant avec l'EV dans la peau de chacun des mannequins (Figure 5-13). Un opérateur extérieur observe les tests effectués, et relève les résultats. Il surveille également, par le biais des capteurs de mouvement situés sous les pieds, que l'expérience se déroule en respectant les consignes définies (paragraphe 5.3.1). Tous les points pouvant être atteints par le mannequin sont ainsi enregistrés.

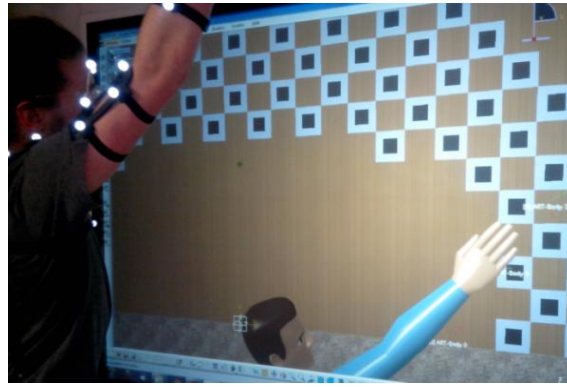


Figure 5-13. Concepteur en immersion contrôlant le mannequin virtuel en temps réel et évaluant l'atteinte de l'EV.

Ainsi, à l'issue de chacune des évaluations (expérimentale (1), modèle statique (2a), mannequin numérique (2b) et mannequin numérique + capture de mouvement (2c)), on obtient, pour chaque participant, le nombre et la localisation de tous les points atteints.

5.4 Résultats

5.4.1 Analyse « globale »

Les résultats d'atteintes obtenus à partir des expériences et des évaluations ont été recueillis pour chacun des quarante participants. L'objectif est d'étudier les tendances d'atteintes globales obtenues pour chaque méthode. Les résultats sont présentés Tableau 5-1. Trois critères généraux sont présentés :

- Le score, défini comme le nombre total de points atteints par les participants, pour chaque méthode;
- L'écart type (σ) du score de chaque sujet, pour chaque méthode (dispersion des résultats par rapport à la moyenne d'atteinte);
- L'erreur, définie comme la différence entre le score obtenu par chaque évaluation (approche 2a, 2b et 2c) et celui obtenu lors de l'expérience avec le sujet réel. Elle représente l'écart global par rapport aux résultats de "référence" (considéré arbitrairement comme ceux de l'expérience avec le sujet réel).

Les 40 participants ayant passé l'expérience, on atteint un total de 3846 points, représentant une moyenne de 96.15 points par participant. D'un point de vue global, les résultats montrent que les évaluations (2a, 2b, et 2c) sous-estiment cette atteinte réelle (erreur positive). Logiquement, c'est le modèle statique qui sous-estime le plus les résultats, avec une erreur relative de 36% (1330 points). L'évaluation par mannequin numérique (2b) fournit des résultats plus proches de l'expérience avec une erreur relative de 18% (soit 672 points). L'intégration de la capture de mouvement (2c) fournit les résultats les plus proches de ceux obtenus en condition expérimentale, avec une erreur relative totale de 7% (soit 284 points). Les séries de résultats obtenues pour chacune des approches, présentent une dispersion de données (autour des moyennes) proche les unes des autres. Les valeurs des écarts types sont intrinsèquement liées à la variabilité entre les participants, et particulièrement en termes d'anthropométrie. Bien que dépendant également de la largeur des épaules et de la longueur des bras, l'atteinte est particulièrement corrélée à la stature des sujets. En

effet, plus le participant sera grand, plus le nombre de points atteints sera important. Pour chacune des approches, le score (nombre total de points atteints) est ainsi tracé en fonction de la stature, en ajustant un modèle linéaire sur chaque série de données (Figure 5-14).

Tableau 5-1. Nombre total de points atteints (score) pour chacune des méthodes avec les écarts types et erreurs associés.

Méthodes	Score total	σ	Erreur
Expérimentation (1)	3846	25	0
Modèle statique (2a)	2516	22	1330
Mannequin numérique (2b)	3174	26	672
Mannequin + capture de mouvement (2c)	3562	27	284

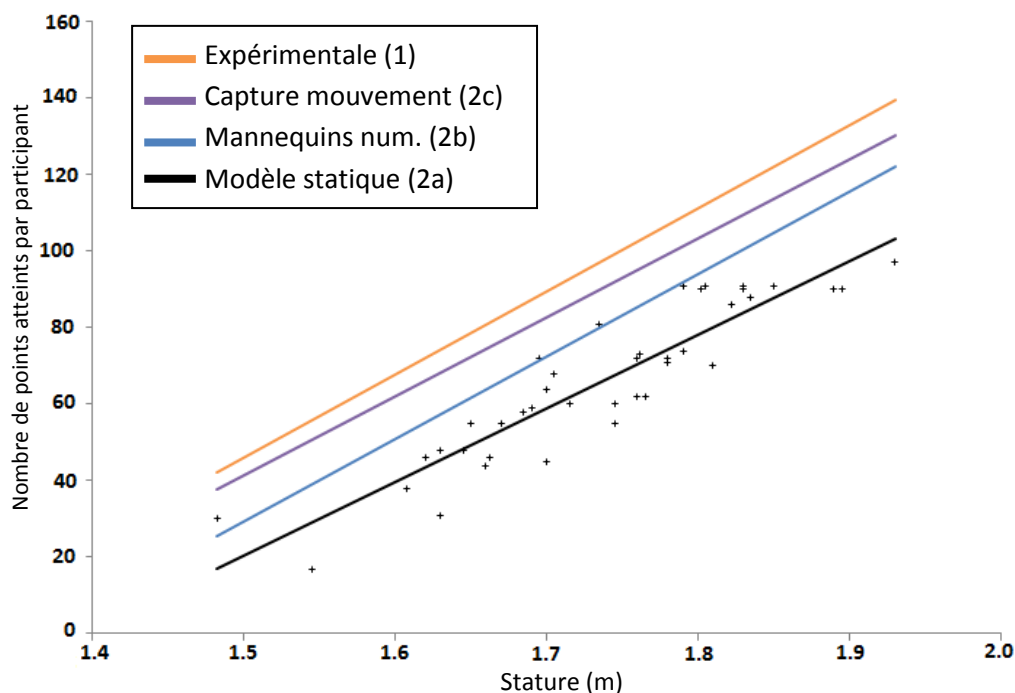


Figure 5-14. Nombre de point atteints par participant en fonction de la stature (avec un modèle de régression linéaire), pour chacune des méthodes.

Pour des raisons de clarté, les résultats obtenus par participant sont uniquement représentée pour le modèle statique (2a) Figure 5-14. Le coefficient de détermination de la régression obtenu dans ce cas est de $R^2=0.84$. Cette valeur importante souligne le fait que l'atteinte est bien directement liée à la stature, mais d'autres caractéristiques anthropométriques du sujet entrent également en compte (16% de variance restent inexpliqués par la stature). Ainsi, pour une même stature, les résultats obtenus peuvent être différent, en fonction de la longueur de bras et de la largeur d'épaule de l'utilisateur. Les coefficients obtenus pour l'évaluation expérimentale, par mannequin numérique (2b) et par capture de mouvement (2c), sont respectivement $R^2=0.78$, $R^2=0.78$, et $R^2=0.75$. C'est à dire que pour une même stature, les résultats trouvés sont en moyenne plus dispersés que pour le modèle statique, due à la nature des évaluations.

Le comportement global d'atteinte en fonction de la stature (pentes des droites) est similaire pour les quatre approches. Les écarts entre chaque droite représentent les différences d'atteintes globales obtenues selon les méthodes. Ainsi, pour une même stature, le nombre de points atteints évalué sera différent d'une méthode à l'autre, avec un écart moyen de plus de 33 points, entre le modèle statique (2a) et l'expérimentation (1). **En dépit de la nature simple de la tâche étudiée, l'analyse globale montre donc des différences importantes entre les différentes évaluations.** La différence observable entre le modèle statique et les autres approches illustre bien que l'atteinte n'est pas seulement corrélée aux caractéristiques anthropométriques des utilisateurs.

Ces résultats fournissent donc des informations sur les tendances d'atteintes globales obtenues, soulignant des différences d'une méthode à l'autre. Afin de mettre en évidence la nature de ces différences, une comparaison locale est également menée.

5.4.2 Analyse "locale"

Cette analyse a pour but d'**étudier les profils d'atteintes** obtenus pour chaque méthode, permettant de renseigner par exemple s'il existe des parties de l'enveloppe où l'atteinte est plus importante que d'autres. Pour cela, en plus des résultats quantitatifs précédemment obtenus, nous devons analyser la localisation des différents points atteints ou non, c'est-à-dire reconstruire la cartographie des enveloppes d'atteintes.

Les données relevées par le biais des expérimentations et évaluations effectuées, fournissent intrinsèquement ces informations, et permettent de reconstruire ces profils, pour chacun des participants. Cependant, il est nécessaire de traiter ces résultats pour pouvoir les exploiter et effectuer une analyse globale.

Premièrement, nous souhaitons **analyser les données d'atteintes qui ne sont pas directement liées aux caractéristiques anthropométriques**. En effet, comme présenté dans le paragraphe précédent, les scores obtenus avec les approches 1, 2b et 2c sont supérieurs à celui du modèle statique, défini exclusivement à partir des données dimensionnelles des sujets. Nous proposons donc d'évaluer les atteintes par rapport à celle du modèle statique, pour analyser et mettre en évidence les différences obtenues.

Ensuite, les différences des caractéristiques anthropométriques font que les **résultats obtenus sont propres à chaque sujet**. Ainsi, une personne très grande atteindra intrinsèquement plus de point qu'une plus petite, rendant difficile de comparer objectivement les différents profils obtenus. Pour s'affranchir des différences interindividuelles, nous avons choisi de **normaliser les résultats** obtenus, afin de représenter **les atteintes de tous les sujets sur une représentation graphique commune**. La procédure de normalisation menée permettant la reconstruction des profils d'atteintes est présentée ci-après.

Reconstruction des profils d'atteintes

Comme précisé paragraphe 5.3.1, les points sont répartis de façon complémentaire sur l'infrastructure (asymétrie entre les points gauches et droits) permettant d'augmenter la répartition spatiale des points sans augmenter le nombre d'interrupteurs. Cette particularité est utilisée pour

reconstruire les profils. L'atteinte est ainsi étudiée comme une unique enveloppe, agrégée à partir des points atteints par le bras gauche et par le bras droit (les points gauches sont numériquement remplacés par symétrie sur le côté droit). Les capacités d'atteintes sont donc considérées comme symétriques pour chaque sujet (les longueurs de bras mesurées sont extrêmement proches pour tous les participants, et les évaluations ont été menées en considérant le corps placé au centre de la structure). Ceci permet également d'homogénéiser les résultats, pour ne pas être tributaire de l'influence d'un bras plus fort que l'autre (droitier/gaucher).

La procédure de normalisation est représentée Figure 5-15, et détaillée ci-après.

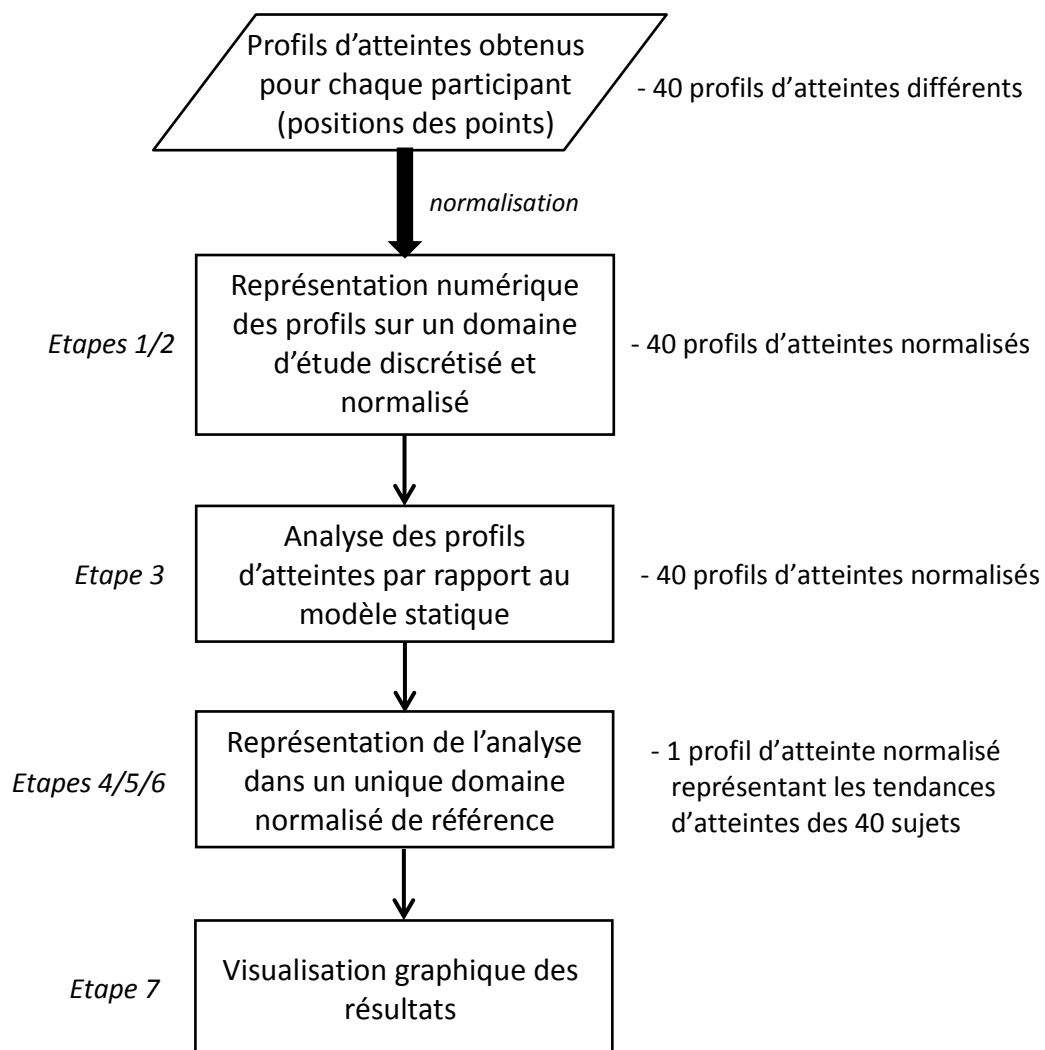


Figure 5-15. Représentation schématique de la procédure de normalisation appliquée aux données d'atteintes relevées.

La reconstruction et la comparaison des comportements d'atteintes sont réalisées par la procédure en sept points suivante:

- (1) L'infrastructure de l'expérience est numériquement représentée par un domaine discrétisé où tous les points sont repositionnés symétriquement du côté droit. Ce domaine est défini par une matrice Z de dimension $[25,31]$ permettant de cartographier tous les points situés sur la plaque (Figure 5-16). Ainsi, la première colonne de la matrice représente les points situés à une abscisse $X_0 = 0$ du repère de référence (O,X,Y) .

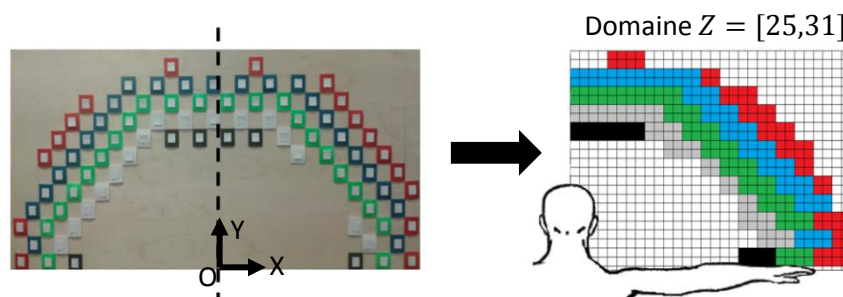


Figure 5-16. Domaine discrétisé défini comme un maillage. Les points de la grille sont représentés par les éléments de la matrice Z de dimension $[25,31]$.

- (2) **Normalisation de l'enveloppe d'atteinte.** En se basant sur l'équation 1, les points du domaine discrétisé sont remis à l'échelle pour chacun des participants, en fonction de ses caractéristiques anthropométriques ; $(X_i^{(n)}, Y_j^{(n)})$ représentent les nouvelles coordonnées des points pour le participant (n) , (X_i, Y_j) les coordonnées des points par rapport au repère de référence (Figure 5-16), $L_{arm}^{(n)}$ et $L_{shoulder}^{(n)}$ respectivement la longueur de bras et la largeur d'épaule du participant (n) . Ainsi, l'atteinte est représentée dans un domaine normalisé où les positions initiales des épaules et des doigts sont respectivement définies par les points "0" et "1". **Toutes les enveloppes d'atteintes définies par le modèle statique sont ainsi représentées par un arc de cercle normalisé**, avec 0 comme centre et 1 comme rayon (Figure 5-17). Les matrices $Z^{(n)}$ obtenues (toujours de dimension $[25,31]$) permettant ainsi de cartographier les points de la plaque par rapport aux données dimensionnelles des sujets. La première colonne de la matrice représente désormais les points situés à une abscisse

$$X = \frac{(X_0 - \frac{1}{2}L_{shoulder})}{L_{arm}}$$

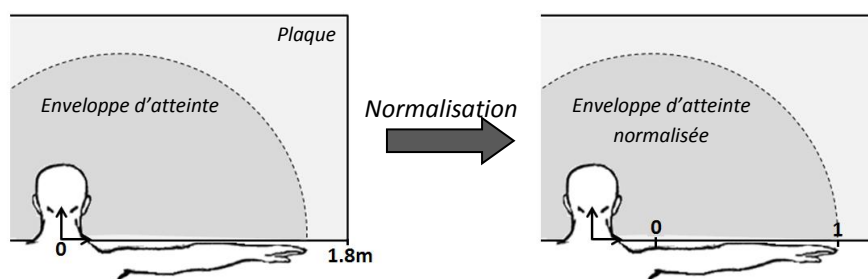


Figure 5-17. Représentation schématique de la normalisation du profil d'atteinte.

- (3) **Evaluation par rapport au modèle statique (2a).** On souhaite étudier l'atteinte par rapport au modèle statique. Pour cela, on définit les cellules (i, j) des matrices $Z^{(n)}$ à l'aide d'un code

numérique spécifique. Ainsi, un point situé en dehors de l'arc de cercle normalisé ($\sqrt{(X_i^{(n)^2} + Y_j^{(n)^2}) > 1$) et atteint par l'une des méthodes (1, 2b, 2c) est noté par la variable indicatrice $Z^{(n)}(Y_j^{(n)}, X_i^{(n)}) = 1$. Inversement, un point situé à l'intérieur de l'arc de cercle ($\sqrt{(X_i^{(n)^2} + Y_j^{(n)^2}) < 1$) et non-atteint par l'une des méthodes est noté $Z^{(n)}(Y_j^{(n)}, X_i^{(n)}) = -1$. Dans les autres cas, $Z^{(n)}(Y_j^{(n)}, X_i^{(n)}) = 0$. Les matrices $Z^{(n)}$ représentent ainsi la cartographie de l'atteinte pour chaque participant, par rapport au modèle statique. Une cellule de la matrice définie par le code « 1 » représente un point atteint par excès au modèle statique, et le code « -1 » un point atteint par défaut. Si la matrice est entièrement composée de 0, alors le profil d'atteinte évalué est strictement identique à celui du modèle statique.

Cependant à cette étape, les zones atteintes sont encore spécifiques à chaque sujet (40 domaines d'atteintes normalisés différents) et ne peuvent pas être comparées entre elles. En effet, les sujets n'atteignant pas le même nombre de points, le maillage représentant le domaine d'atteinte (entre 0 et 1) est différent pour chaque sujet (Figure 5-18).

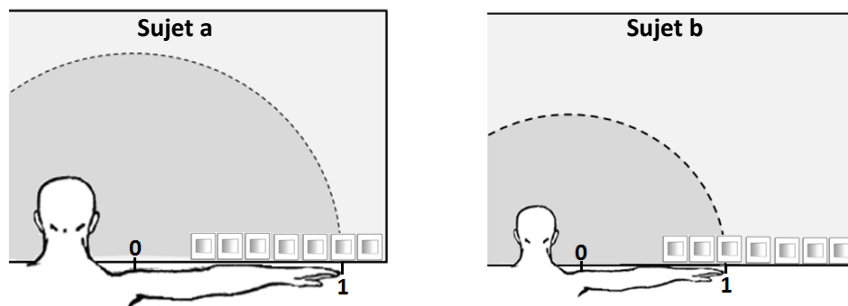


Figure 5-18. Les sujets n'atteignant pas le même nombre de points, les profils normalisés (maillage) sont différents pour chaque participant.

- (4) **Définition du maillage de référence.** Pour étudier toutes les atteintes obtenues sur une même représentation, un maillage de référence normalisé est donc créé. Celui-ci correspond au maillage ayant le plus petit pas (c.à.d. celui correspondant à l'individu présentant la plus grande longueur de bras).
- (5) **Représentation des atteintes dans le maillage de référence.** Il est désormais nécessaire de représenter les résultats de chacun des sujets sur le domaine normalisé de référence. Pour cela, un ré-échantillonnage à taux variable des résultats individuels (matrices $Z^{(n)}$) par rapport au maillage de référence est effectué. Le taux d'échantillonnage est défini à partir du rapport entre les dimensions du maillage de référence et celles du maillage étudié. Les matrices normalisées ainsi obtenues sont notées $Z_N^{(n)}$. Cette transformation implique une restriction des domaines d'études au domaine de référence, ainsi qu'une remise à l'échelle des cellules dans le maillage de références (Figure 5-19).

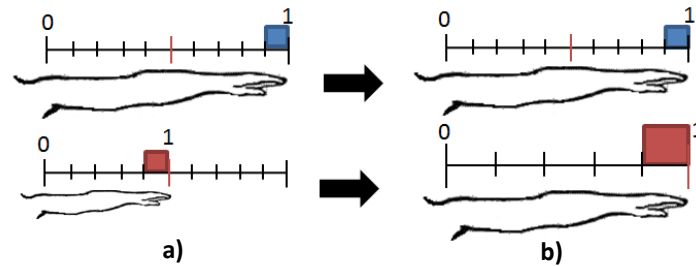


Figure 5-19. Principe de la procédure de mise à l'échelle, avec a) le bras du sujet dans le maillage de référence, et b) le bras dans le maillage de référence après mise à l'échelle (correspondant au re-échantillonnage).

- (6) Les matrices normalisées $Z_N^{(n)}$ obtenues peuvent ainsi être additionnées les unes aux autres, définissant une matrice globale Z_{finale} (Equation 2) représentant les différentes zones et fréquences d'atteintes pour tous les sujets. Chaque cellule de la matrice Z_{finale} en dehors de l'arc de cercle normalisé ($\sqrt{(X_i^{(n)^2} + Y_j^{(n)^2})} > 1$) peut alors être définie par une valeur allant de 0 à 40. De même, chaque cellule de la matrice Z_{finale} à l'intérieur de l'arc de cercle ($\sqrt{(X_i^{(n)^2} + Y_j^{(n)^2})} < 1$) peut alors être définie par une valeur allant de -40 à 0. Ainsi, une cellule de Z_{finale} égale à 0 représente un résultat d'atteinte parfaitement corrélé entre le modèle statique et la méthode étudiée, et ce pour tous les sujets (pas d'effet de compensation possible entre les résultats).
- (7) Pour chacune des méthodes, les matrices Z_{finale} obtenues sont finalement représentées graphiquement, par le biais d'une cartographie par niveaux de couleurs des valeurs de chaque cellule (Figure 5-20).

$$X_i^{(n)} = \frac{(X_i - \frac{1}{2} L_{shoulder}^{(n)})}{L_{arm}^{(n)}}, \quad Y_j^{(n)} = \frac{Y_j}{L_{arm}^{(n)}}; \quad i = 1, \dots, 31; j = 1, \dots, 25; n = 1, \dots, 40 \quad (1)$$

$$Z_{finale} = \sum_{n=1}^{40} Z_N^{(n)} \quad (2)$$

La Figure 5-20 représente les cartographies par niveaux de couleurs obtenues pour les approches 1, 2b et 2c. Les fréquences d'atteintes sont cartographiées, allant du bleu pour les faibles valeurs au rouge pour les fréquences les plus élevées. Pour faciliter la lecture du graphique, les zones neutres où $Z = 0$ (initialement définies par une coloration bleue) sont indiquées à l'aide d'une coloration blanche. Pour l'évaluation par mannequin numérique seul par exemple, nous pouvons constater que l'atteinte latérale est très proche du modèle statique, avec des niveaux de couleurs assez faibles, localisés autour de la frontière de l'atteinte statique (abscisse égale à 1). La forte coloration rouge en revanche (située à une ordonnée supérieure à 1) représente une forte fréquence d'atteinte par excès. C'est-à-dire que dans cette zone, de nombreux participants ont atteints des points localisés en dehors du modèle statique.

Les cartographies obtenues Figure 5-20 permettent de mettre en évidence les différences de profils d'atteintes entre chacune des méthodes. En complément de ces graphiques et afin de faciliter

l'étude comparative, les résultats obtenus ont également été représentés sur un même graphique. Pour cela, un seuillage des données à 50% d'effectif a été réalisé, permettant de représenter les profils d'atteintes médians obtenus pour chacune des méthodes (Figure 5-21).

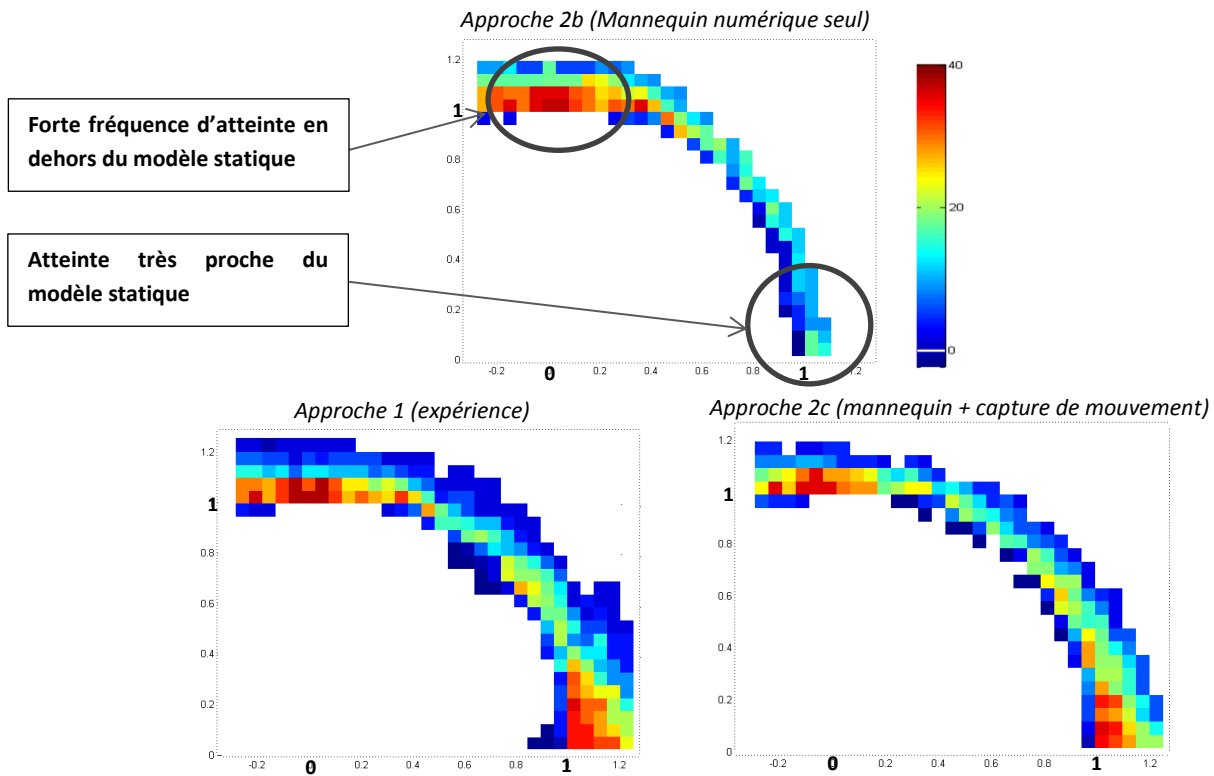


Figure 5-20. Représentation cartographique de la matrice Z_{finale} (localisation et fréquence des atteintes étendues) définie dans le domaine normalisé de référence, obtenue pour chacune des méthodes (approche 1, 2b et 2c).

Les lignes Figure 5-21 représentent ainsi l'atteinte médiane pour les 40 sujets, et pour chaque méthode. La partie hachurée modélise ainsi la zone médiane expérimentale, c'est-à-dire que 50% des participants ont atteint tous les points dans cette zone. Les lignes bleu et violette représentent les zones d'atteintes médianes obtenues pour les approches 2b et 2c. Comme explicité précédemment, les zones d'atteintes définies à partir du modèle statique (ligne noire) sont toutes représentées par un unique arc de cercle de centre 0, et de rayon 1.

Cette représentation permet d'analyser plus finement les tendances et stratégies d'atteintes mise en jeu pour chacune des évaluations effectuées. On peut premièrement observer que chacune des méthodes (1, 2b et 2c) fournit bien des évaluations d'atteintes supérieures au modèle statique (lignes médianes toujours situées au-delà de l'arc de cercle noir (Figure 5-21). De plus, les résultats obtenus expérimentalement sont toujours par excès par rapport aux autres méthodes (lignes bleu et violet situées dans la zone hachurée). Nous pouvons également observer que ceci est vrai, tout au long du profil d'atteinte.

Les profils d'atteintes obtenus confortent les résultats présentés paragraphe 5.4.1. De plus, ils permettent de souligner plus précisément l'origine des différences de résultats entre les méthodes. Nous proposons de discuter et de détailler ces données dans le paragraphe suivant.

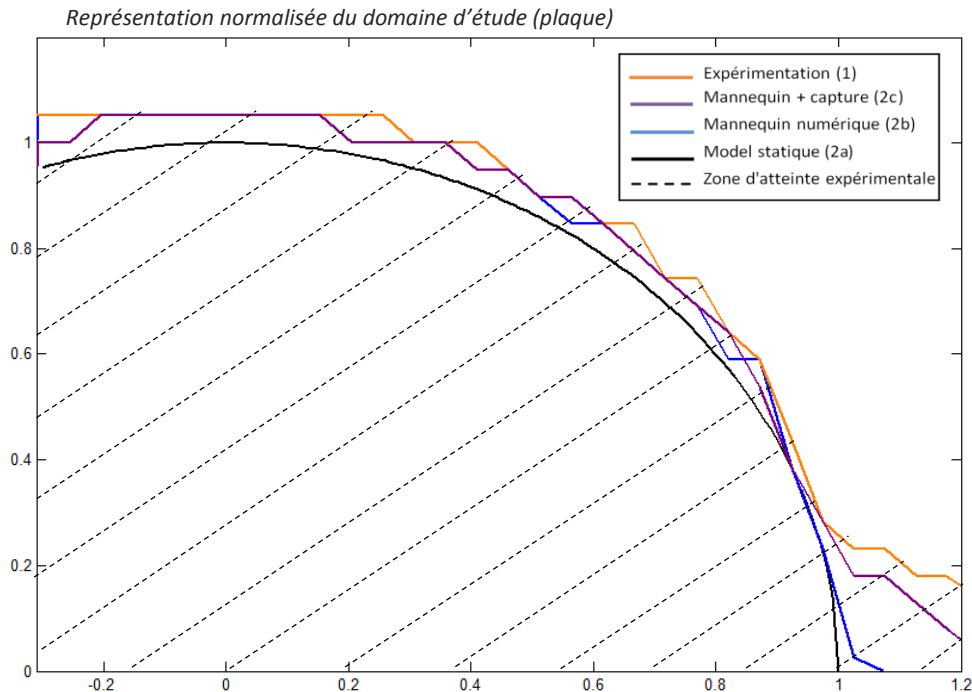


Figure 5-21. Lignes d'atteinte médianes normalisées obtenues à partir des tests expérimentaux (orange), des évaluations par mannequins numériques (bleu), et par l'approche proposée (violet). La ligne noire représente l'arc de cercle normalisé défini à partir du modèle statique. La zone hachurée définit l'atteinte expérimentale médiane (50% d'accommodation).

5.5 Discussion

Résultats

Premièrement, nous pouvons observer que l'atteinte verticale (correspondant aux points situés au-dessus de la tête) obtenue expérimentalement (approche 1) est plus importante que celle définie par le profil statique (approche 2a) (Delangle et al. 2014). C'est-à-dire que l'atteinte est étendue au-delà des dimensions structurelles des participants. En effet, en plus de ces données structurelles, les mouvements du corps (et donc l'atteinte) dépendent des comportements biomécaniques des membres et des articulations (Delangle et al. 2015a). D'après les observations réalisées lors des expériences, la principale cause de cette augmentation verticale de l'atteinte est due au déplacement par flexion de l'épaule, couplé à une inclinaison du rachis et à une légère rotation du bassin (Dufour & Pillu 2007) (Figure 5-22). Les pieds étant fixés sur le sol, les participants ne peuvent en effet pas se mettre sur la pointe des pieds pour augmenter leurs atteintes.

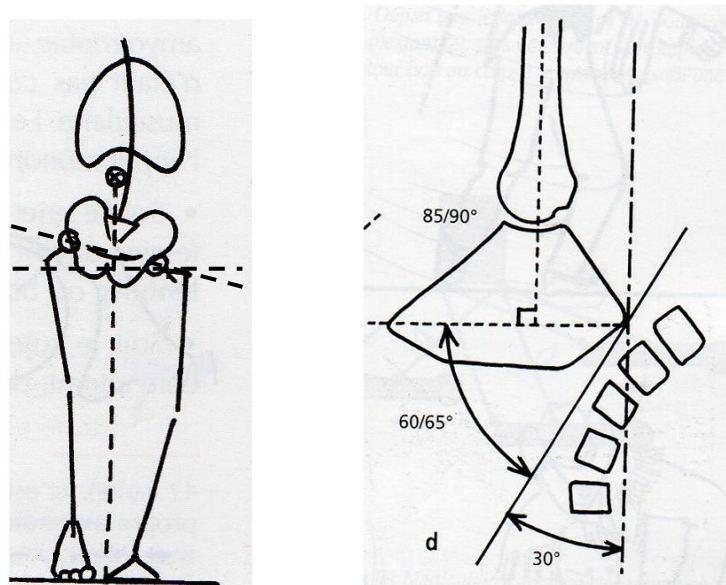


Figure 5-22. Rotation du bassin (gauche), et élévation de l'épaule (système scapulo-huméral et scapulo-thoracique) et inclinaison du rachis (droite) impliquées dans l'élévation de la hauteur d'atteinte (images adaptées de Dufour & Pillu (2007)).

Les mêmes observations peuvent être faites par le biais de notre approche (2c), lorsque les mannequins numériques sont pilotés par la capture de mouvement. La capture de mouvement restituant fidèlement les mouvements de l'opérateur, ces **caractéristiques sont intrinsèquement prises en compte** dans l'évaluation. Le modèle d'atteinte du mannequin numérique seul semble également prendre en compte cette particularité, l'atteinte médiane verticale étant confondue avec les deux autres méthodes (Delangle et al. 2015b). En effet, l'épaule du mannequin est modélisée par une articulation à 5 degrés de liberté, permettant de simuler un mouvement d'élévation lors de la flexion du bras (et donc une augmentation verticale de l'atteinte (Ranger 2010; Dassault-Systemes 2000)).

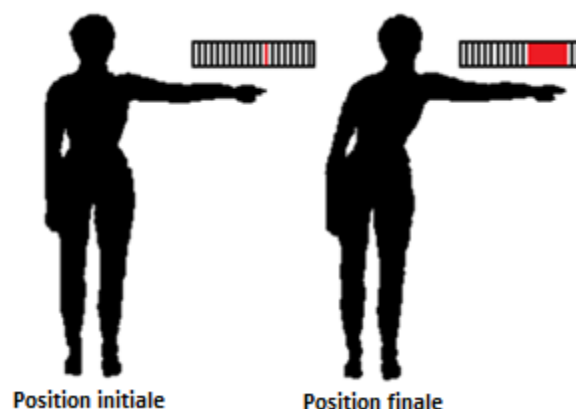


Figure 5-23. Balance médio-latérale impliquée dans l'atteinte latérale (image tirée de Brauer & Burns (1999)).

Deuxièmement, nous pouvons observer que l'atteinte latérale obtenue expérimentalement est également plus importante que celle définie par le profil statique (arc de cercle). Même avec les pieds contraints au niveau du sol, les comportements biomécaniques des membres permettent aux

participants d'étendre latéralement leurs atteintes. Ici, les combinaisons de mouvements mises en jeu sont assez complexes. Cependant, d'après les observations faites, l'atteinte est principalement due à la stabilité médio-latérale et aux capacités de rotation du bassin des participants (Brauer & Burns 1999) (Figure 5-23). La Figure 5-21 indique également que l'atteinte médiane obtenue par mannequin numérique seul (approche 2b) est très proche de celle définie par le modèle statique. Autrement dit, le modèle d'atteinte défini par le logiciel fourni des prédictions qui sous-estiment l'atteinte réelle mise en jeu sur la région latérale (par rapport à l'expérimentation 1).

Il paraît **difficile de prendre en compte ce type de caractéristiques comportementales, en utilisant une évaluation classique par mannequin numérique**. Les concepteurs peuvent tenter de manipuler cinématiquement le mannequin (augmentation de l'atteinte par cinématique directe ou inverse) pour simuler ces comportements. Toutefois, il n'est pas aisé de définir manuellement le degré correct d'abduction du bassin ou torsion du tronc à appliquer pour simuler cette atteinte latérale (Abdel-Malek & Arora 2009). Ainsi, la posture du mannequin pourrait ne pas être réaliste et engendrer des analyses faussées.

A contrario, l'utilisation de la capture de mouvement permettant une implication physique du concepteur, les postures adoptées sont représentatives de la réalité. Ainsi, les comportements et stratégies d'atteintes sont intrinsèquement pris en compte, et **l'atteinte latérale est plus fidèle aux données trouvées expérimentalement**. L'évaluation de l'atteinte par le biais de notre approche fournit donc des résultats (profils d'atteintes) proches de ceux mesurés expérimentalement.

A noter que dans cette étude, nous avons choisi d'analyser un problème d'accessibilité simple (2D), limitant délibérément les possibilités de mouvements et déplacements du sujet. Malgré cela, les évaluations réalisées par le biais des mannequins numériques seuls (approche 2b) sous-estiment certaines parties de l'atteinte (directement liées au comportement du sujet). Ainsi, dans un cas d'étude où les mouvements du sujet ne seraient pas contraints, les différences obtenues entre ces analyses par mannequin numérique « classique », et les évaluations interactives (approche 1 et 2c) seraient d'autant plus importantes. Ceci est particulièrement vrai lors d'évaluation d'environnements et de produits à topologie complexe, où les postures et comportements adoptées par les utilisateurs peuvent être très spécifiques.

Approche méthodologique

Une légère sous-estimation des résultats d'atteintes peut être remarquée entre l'approche méthodologique proposée (2c) et l'approche expérimentale (approche 1). En effet, bien que le panel d'utilisateurs choisi ne comportait ni déficiences ni limitations physiques particulières, les capacités physiques et biomécaniques varient tout de même d'un individu à l'autre. L'**implication physique** étant ici **propre à celle de l'opérateur** en immersion, cette variation n'est pas considérée lors des évaluations virtuelles. De plus, le processus de couplage par capture de mouvement défini par le logiciel est assez fastidieux et peut manquer de précision dans certains cas. Le couplage étant réalisé à partir de la définition d'une même posture initiale pour l'opérateur et le mannequin, une légère variation dans l'initialisation peut engendrer des changements dans l'interaction. La cinématique du mannequin est intrinsèquement définie par le logiciel, ce qui peut également engendrer des problèmes de conflits lors du couplage des mouvements. Ceci est particulièrement vrai lorsque les caractéristiques anthropométriques de l'opérateur et du mannequin sont très différentes.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en application l'approche méthodologique précédemment proposée, fondée sur l'utilisation conjointe de mannequins numériques et d'interfaces de réalité virtuelle.

Les concepteurs sont physiquement impliqués dans l'évaluation, et peuvent modéliser des utilisateurs finaux ayant des caractéristiques anthropométriques différentes. Les évaluations sont ainsi effectuées par le biais d'un **système « Homme réel-virtuel, Produit virtuel, Environnement virtuel »**. Les utilisateurs sont représentés par le biais des mannequins virtuels, sans être physiquement présents. Ainsi, les produits peuvent être testés physiquement dès les phases amont du processus de conception avec des comportements réalistes pouvant s'adapter au problème de conception rencontré, contribuant à limiter le nombre de tests réels effectués, souvent longs et coûteux à réaliser.

L'application de l'approche proposée à une tâche d'évaluation ergonomique fournit des **résultats proches de ceux trouvés sous conditions expérimentales réelles**. Ainsi, plus qu'une simple modélisation qualitative du problème, l'intégration d'interfaces de réalité virtuelle peut permettre d'effectuer des évaluations de manière quantitative. Ici, le pilotage avec la capture de mouvement, action interactive et intuitive, permet une meilleure prise en compte par le concepteur lui-même des mouvements du corps, et donc une meilleure simulation des volumes dans lesquels évolue le mannequin, optimisant l'analyse des zones d'atteinte. Cette approche permet, d'une manière générale, de représenter de façon réaliste les comportements futurs de l'utilisateur, pouvant dans certain cas être difficiles à modéliser par le biais de mannequins numériques seuls (exemple Figure 5-24).

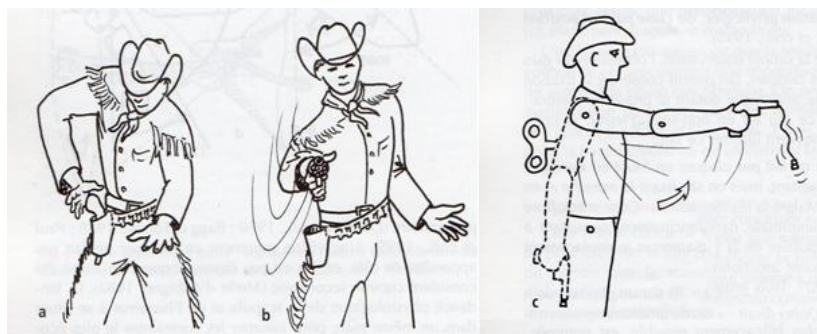


Figure 5-24. Les westerns montrent fréquemment le geste de dégainer un revolver avec l'impulsion naissant au niveau thoracique (a) et le mouvement s'achevant sur le lancer de celui-ci (b). Un mannequin ne peut reproduire cette synchronisation (c) (Dufour & Pillu 2007).

Outre ces résultats, cette étude nous a permis de mettre en avant certaines limitations, et spécifiquement dans une optique de conception *pour tous*. Plusieurs difficultés sont directement liées à l'utilisation de mannequins numériques et d'outils CAD « classiques ».

Premièrement, certaines inconsistances peuvent intervenir lorsque le mannequin numérique et l'opérateur présentent des caractéristiques anthropométriques très différentes. En effet, le **modèle cinématique propre au mannequin**, intrinsèquement défini par le logiciel CAD, peut dans ce cas

rentrer en conflit avec les données transmises par la capture de mouvement. Le comportement du mannequin dépend donc en partie du modèle défini par le logiciel, variable d'un outil à l'autre.

De plus, la grande majorité des mannequins définis par les logiciels CAD existants sont conditionnés par une représentation anthropométrique limitée au spectre classique des centiles (**voir étude en Annexe A**). Ainsi, il devient **impossible pour les concepteurs de générer des mannequins présentant des morphologies représentatives d'utilisateurs spécifiques** (Ranger 2010). Or, dans une démarche de conception *pour tous*, il est essentiel de pouvoir représenter des utilisateurs ayant n'importe quelles caractéristiques anthropométriques, même en dehors du spectre classique des percentiles adultes. Nous pouvons d'ailleurs souligner que de nombreux travaux en ergonomie basent leurs travaux sur des représentations de mannequin cantonnés à une gamme réduite de modifications, limitant les possibilités d'analyses. Dans Datas (2013) par exemple, la taille de bras du mannequin n'est pas modifiable, alors que celui-ci est utilisé pour construire et simuler des tâches d'atteinte.

Outre ces aspects structurels, nous pouvons également souligner certaines limitations vis-à-vis de la prise en compte des capacités physiques des utilisateurs. En effet, ces mannequins **ne permettent pas aux concepteurs de représenter les capacités et déficiences spécifiques des utilisateurs**. Or, cette prise en compte est essentielle dans une démarche de conception visant à développer des produits adaptés à un large spectre de sujets (Waller et al. 2010).

D'un point de vue général, il semble difficile pour les concepteurs de modéliser et d'intégrer certaines caractéristiques spécifiques des utilisateurs, dans une simulation par mannequin numérique. Les logiciels CAD existant fournissent en effet un cadre strict de données et de modèles, difficilement modifiable. Ainsi, les simulations sont le plus souvent contraintes aux caractéristiques intrinsèquement définies par le logiciel utilisé.

La réalité virtuelle, dans une optique de conception *pour tous*, doit pouvoir permettre aux concepteurs de mieux simuler et modéliser les caractéristiques anthropométriques et physiques spécifiques. Nous proposons ainsi dans le chapitre suivant, le **développement d'un dispositif de réalité virtuelle**, visant à optimiser l'intégration et la prise en compte des utilisateurs ayant des besoins spécifiques, dans le processus de conception (Figure 5-25). Plus qu'une intégration de mouvements réalistes, l'objectif est de permettre aux concepteurs de **mieux simuler et d'expérimenter l'activité spécifique de l'utilisateur**, et donc l'usage futur du produit. Ceci passe notamment par une meilleure implication des concepteurs dans un **processus d'évaluation interactif et immersif**.

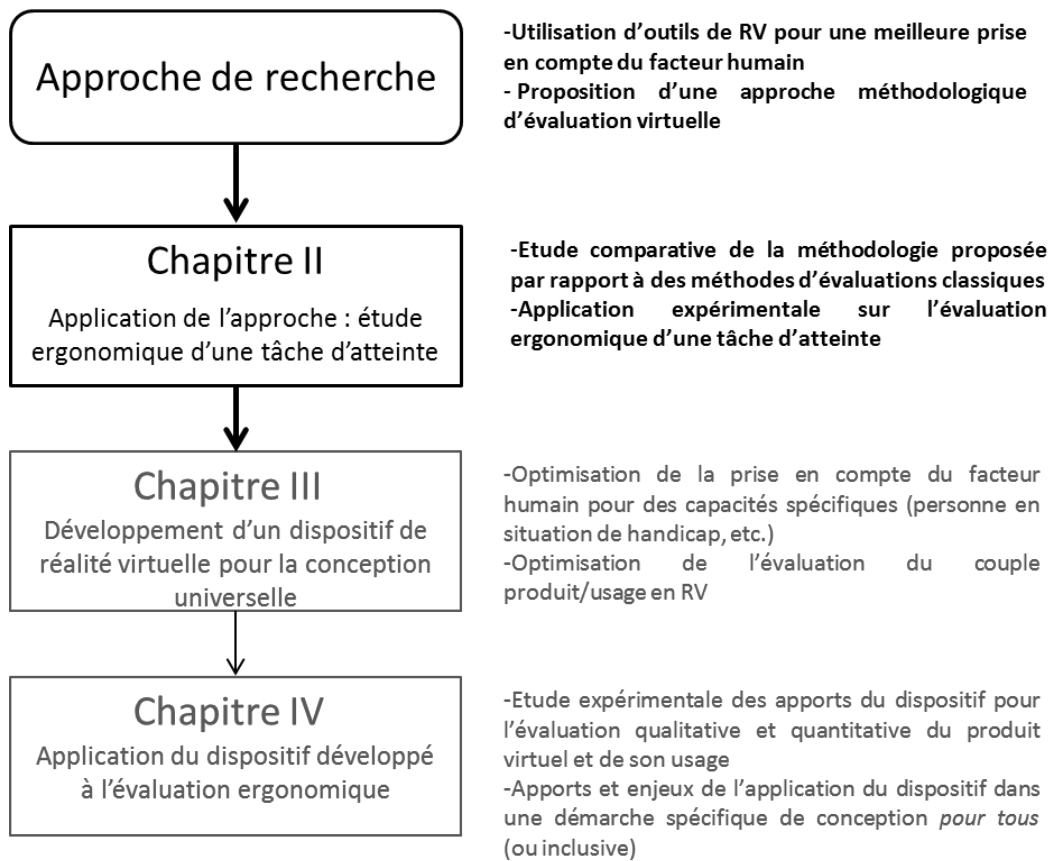


Figure 5-25. Représentation des différents chapitres et points précédemment développés.

Chapitre III

Création d'un dispositif de réalité virtuelle pour la conception universelle

6 Création du dispositif de réalité virtuelle

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons de développer un **dispositif de réalité virtuelle** permettant de répondre aux différents besoins soulevés précédemment.

Le premier objectif est de fournir aux experts métier des moyens de **mieux modéliser et intégrer les caractéristiques spécifiques des utilisateurs, et notamment des personnes présentant des déficiences physiques, durant l'évaluation de concepts**. Nous pensons que la compréhension des besoins de personnes en situation de handicap, des personnes âgées, des personnes à besoins spécifiques, ne peut être effective que si les concepteurs sont capables de ressentir clairement les contraintes associées, et leurs impacts sur l'usage du produit. Notre approche est ainsi basée sur l'implication des concepteurs dans une évaluation immersive, afin qu'ils puissent interagir dans l'EV « dans la peau » de l'utilisateur final. Ceci doit permettre une **meilleure représentation des sujets et de leurs capacités**, ainsi qu'une meilleure identification de la part du concepteur. Dans ce cadre, la réalité virtuelle est utilisée comme un « pont », permettant de faire le lien entre l'opérateur immergé et l'utilisateur final, avec ses caractéristiques anthropométriques et physiques propres (Figure 6-1). Cette approche doit donc permettre d'enrichir les évaluations virtuelles de manière subjective, mais également de façon objective.

Le second objectif est ainsi d'intégrer des outils, directement dans l'EV, fournissant un support aux concepteurs pour réaliser des **analyses quantitatives de l'activité** de l'utilisateur. Ces analyses sont liées à des **données normées**, basées sur des considérations ergonomiques générales, mais également sur des **données spécifiques**, propres aux capacités physiques du sujet. L'objectif est ainsi d'aider les concepteurs à définir des recommandations quantifiées, permettant d'évaluer objectivement le prototype et son usage, en fonction des caractéristiques du sujet. *Nous nous intéresserons principalement aux capacités motrices des membres supérieurs, ainsi qu'aux capacités sensorielles de l'utilisateur (spécifiquement la vision). Les données liées aux capacités cognitives ne seront pas traitées.*

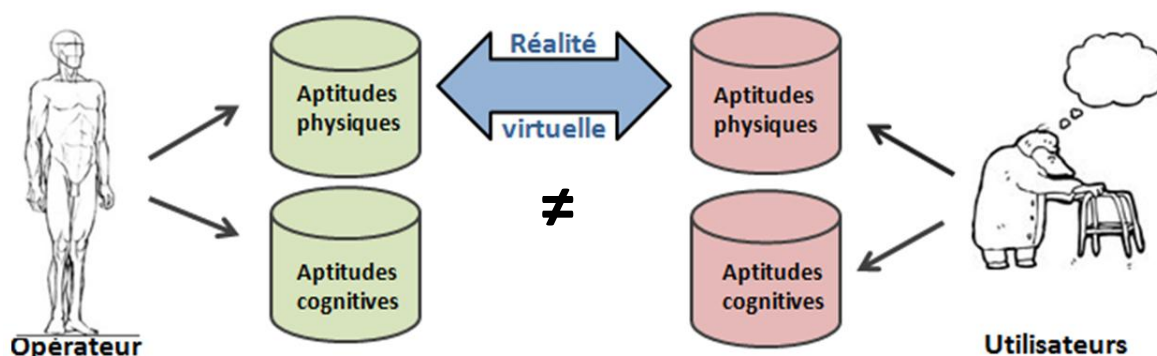


Figure 6-1. La réalité virtuelle : un pont entre l'opérateur immergé et l'utilisateur simulé.

Le paragraphe 6.2 présente la création de l'infrastructure de notre dispositif, composée d'une partie **logicielle** et d'une partie **matérielle**. Concernant l'infrastructure logicielle, nous présentons une

approche originale basée sur l'exploitation d'un moteur de rendu 3D temps réel, classiquement utilisé dans la création de jeux vidéo. L'infrastructure matérielle est quant à elle basée sur des interfaces comportementales immersives.

Dans le paragraphe 6.3, nous proposons de définir un mannequin virtuel paramétrable. Couplé à l'infrastructure développée, celui-ci permet aux concepteurs d'interagir avec l'EV « dans la peau » de l'utilisateur final.

Le paragraphe 6.4 propose une visualisation des résultats immersifs obtenus et une analyse de l'impact du dispositif sur l'implication physique du concepteur immergé dans l'EV.

En plus des caractéristiques anthropométriques, le paragraphe 6.5 propose d'intégrer des données liées aux capacités physiques de l'utilisateur. Des paramètres ergonomiques normés et spécifiques permettent d'évaluer le comportement du mannequin dans l'EV. Nous présentons également la possibilité d'intégration de déficiences spécifiques (dégénérescence visuelle liée à l'âge).

Dans le paragraphe 6.6 nous proposons la création d'une interface utilisateur pour optimiser l'intégration des outils et données développées dans la simulation immersive. Dans une dernière partie, nous effectuons une conclusion et une discussion sur les apports du dispositif présenté, dans la prise en compte des personnes en situation de handicap durant les phases immersives de conception.

6.2 Création de l'infrastructure

L'infrastructure doit permettre 1) de faire le lien entre l'opérateur réel et l'EV, et 2) d'interagir dans l'EV « dans la peau » d'un mannequin virtuel, avec un comportement naturel proche du réel. D'une manière globale, celle-ci doit également fournir un support pour le développement permettant de gérer les événements du monde virtuel, et de créer les différentes applications souhaitées. Elle sera ainsi composée de deux parties distinctes complémentaires. Une partie logicielle « classique », c'est-à-dire un environnement virtuel dans lequel il est possible d'intégrer et d'interagir avec des éléments. Une seconde partie matérielle, permettant de faire le lien entre l'homme et le système.

6.2.1 Infrastructure logicielle

6.2.1.1 Utilisation d'un moteur de rendu 3D temps réel

Les interfaces 3D des moteurs de jeux vidéo sont de plus en plus utilisées pour des applications de formation, de développement, ou encore de simulation. On les retrouve par exemple dans des développements pour l'Éducation, la formation, la culture, l'environnement, la santé, les sciences, la politique ou l'économie (Prensky 2005; Frischer 2011; Parvati et al. 2011; Heinrichs et al. 2014), ainsi que dans l'industrie et la recherche (Friese et al. 2008; Marion 2010; Yan et al. 2011).

Ces moteurs de rendu 3D temps réel peuvent également être un support pour la conception et l'évaluation d'environnements (Eberly 2006; Kumar 2013), fournissant une alternative intéressante aux environnements CAD classiques. Ils offrent en effet de grandes possibilités d'intégration de modules (logiciel et matériel), permettant d'engager les utilisateurs finaux dans une simulation plus interactive. Ils permettent ainsi le couplage entre prototypes virtuels, interfaces d'interactions, données comportementales, et EV réalistes (gestion de la physique, etc.).

Nous proposons ici une approche originale basée sur l'utilisation d'un moteur de rendu 3D temps réel, pour le développement d'un dispositif de conception immersif. La partie suivante présente l'infrastructure logicielle choisie pour le développement du dispositif.

6.2.1.2 Infrastructure choisie

Suite à l'examen de plusieurs logiciels, nous avons choisi Unity3D version 4.5.2 (Figure 6-2) pour le développement du dispositif, répondant en tout point aux exigences attendues. C'est un moteur de rendu 3D temps réel fournissant un environnement configurable permettant le développement de scènes virtuelles interactives. Il intègre un moteur physique permettant de gérer les collisions et les interactions de manière réaliste. C'est également un programme extensible, c'est-à-dire acceptant l'ajout de scripts permettant de contrôler le comportement des éléments de la scène virtuelle. Il est compatible avec de nombreux formats 3D permettant l'intégration d'objets et d'environnements virtuels. Il gère également de multiples ressources (audio, photo, vidéo, etc.), et permet un interfaçage avec de nombreux dispositifs de réalité virtuelle (casques immersif par exemple). Enfin, un des grands avantages du logiciel est qu'il propose une licence gratuite très complète.

Cet outil est donc intéressant dans le cadre de nos recherches, car il permettra de définir rapidement des EV's dont les éléments pourront être dotés de comportements spécifiques programmables.

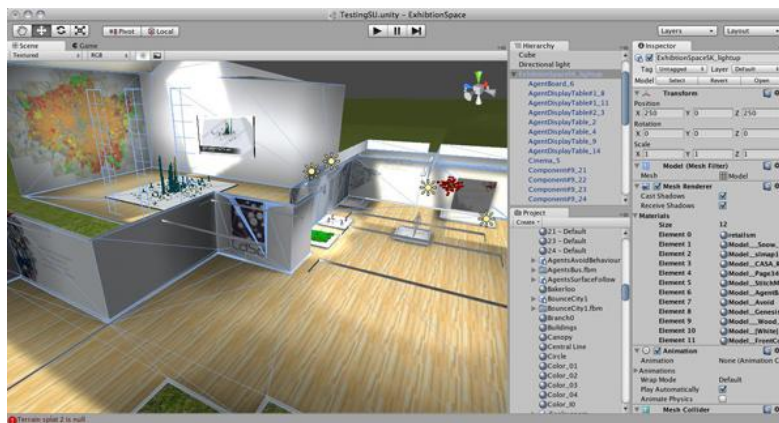


Figure 6-2. Interface du moteur de rendu 3D temps réel Unity4.5.2.

6.2.2 Infrastructure matérielle

L'interface technologique doit réaliser le lien entre l'utilisateur (concepteur, ergonomiste, etc.) et l'EV. Les différents outils mis en place doivent permettre une simulation immersive la plus naturelle et réaliste possible (au sens défini par Christou & Parker (1995)). Le réalisme de certaines modalités sensori-motrices doit donc être maximal pour induire une illusion du réel lors de l'interaction avec l'environnement. Ainsi, il est nécessaire de correctement choisir les interfaces comportementales qui composeront le dispositif de réalité virtuelle. Pour cela, nous nous basons sur le formalisme dit des I² (interaction et immersions) proposé par Fuchs & Moreau (2003) et Richir & Fuchs (2006). Cette approche permet en effet de guider la construction d'un dispositif de RV à partir de trois niveaux d'interaction et d'immersion (sensori-motrices, cognitives, fonctionnelles) liés à l'interfaçage comportemental. La démarche suivie est présentée et détaillée en **Annexe B**. Nous présentons ici nos choix technologiques. Les interfaces comportementales choisies répondent à deux éléments essentiels de l'évaluation immersive : la **visualisation** de l'EV, et l'**interaction physique** dans celui-ci.

6.2.2.1 Visualisation de l'EV

Pour la visualisation de l'environnement, nous utilisons un casque immersif (Oculus Rift DK1) (Figure 2-2). Celui-ci va permettre d'observer le prototype virtuel à l'échelle 1. Contrairement à un système de type CAVE, le champ de vision est ici totalement recouvert. L'utilisateur est ainsi **visuellement immergé**, c'est-à-dire qu'il ne reçoit plus de stimuli visuels venant de l'environnement réel (il ne peut par exemple pas observer le comportement de ses membres). Comme nous le verrons par la suite, cette particularité est essentielle dans notre approche. Du fait de la nature même du casque immersif, le sujet pourra également regarder l'EV dans toutes les directions, à partir des mouvements naturels de la tête.

6.2.2.2 Interaction physique avec l'EV

Concernant l'interaction physique, nous utilisons une capture de mouvement optique avec capteurs passifs (ARTrack⁶ v2.8.1), fournissant en temps réel la position et l'orientations des membres de l'utilisateur (17 marqueurs au total sont positionnés sur l'ensemble du corps). Les mouvements captés pourront ainsi être représentés virtuellement, permettant aux utilisateurs d'interagir avec le prototype, et de réaliser des activités dans l'EV (nous reviendrons plus en détail sur ce point dans la suite du document). Le système de capture optique utilisé est composé de 8 caméras infrarouges, permettant de disposer d'un grand volume de travail (cube de 4 mètres de côté), et donc une action libre des mouvements de l'utilisateur. Celui-ci pourra ainsi évaluer le concept virtuel en se déplaçant physiquement dans l'EV, changer de posture (s'accroupir, se redresser, se pencher...), ou encore interagir avec le prototype virtuel et les différents composants de l'environnement. Le moteur physique embarqué dans Unity3D sera utilisé pour gérer les interactions (collisions, événements, etc.).

6.2.3 Couplage entre l'infrastructure matérielle et logicielle

Pour permettre à l'utilisateur d'interagir physiquement avec l'EV, il faut que les différentes interfaces comportementales choisies puissent communiquer avec l'infrastructure logicielle. Différents protocoles ont donc été mis en place pour permettre l'interfaçage entre les outils de réalité virtuelle et Unity3D. Nous présentons Figure 6-3 une vue générale du système d'interface utilisé entre les données de la capture de mouvement et l'EV. Le protocole VRPN et le un plug-in MiddleVR vont permettre de traiter les données envoyées par la capture de mouvement, et de les coupler en temps réel au logiciel Unity4.5.2 (voir **Annexe C** pour une présentation détaillée des différents protocoles).

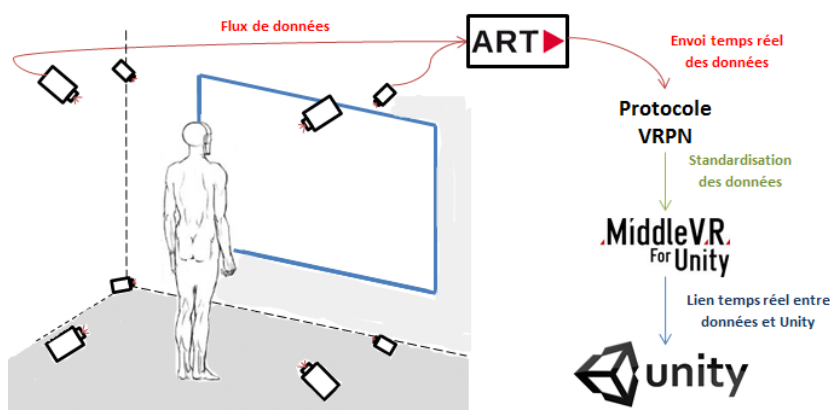


Figure 6-3. Composants permettant l'interfaçage entre la capture de mouvement et Unity4.5.2.

⁶ <http://www.ar-tracking.com/products/software/dtrack2/>

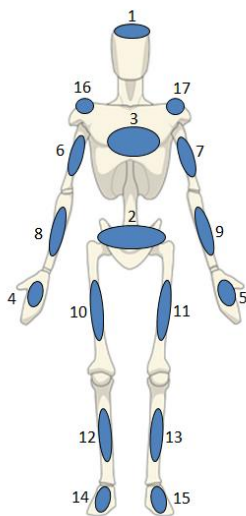
Cette approche a permis de mettre en place une architecture matérielle et logicielle permettant à un opérateur de **visualiser, et d'interagir de manière réaliste et naturelle avec un EV**. Cependant, cette interaction est toujours propre à celle de l'opérateur. Comme présenté dans le paragraphe 4, l'objectif de ce dispositif est de permettre à l'utilisateur de réaliser les phases d'évaluations immersives dans la peau d'un mannequin spécifique, devenant ainsi **acteur représentatif** de l'utilisateur. Nous présentons maintenant la définition et l'intégration d'un mannequin virtuel paramétrable.

6.3 Création d'un mannequin virtuel paramétrable

6.3.1 Création de la structure squelettique

Unity3D permet d'intégrer directement des avatars humanoïdes virtuels articulés avec une structure squelettique déjà préconfigurée. Cependant, nous avons fait le choix de définir notre configuration à partir des fonctionnalités proposées par le logiciel. En effet, nous voulons disposer d'un mannequin configurable, ce qui nécessite de pouvoir modifier à la fois l'apparence, la cinématique et le comportement de chacun de ses membres, ce qui est très limité avec un avatar préconfiguré. De plus, des inconsistances (mouvements imprévisibles, conflits, etc.) peuvent apparaître lors du couplage des mouvements de l'utilisateur et du mannequin (particulièrement vrai si les caractéristiques de l'un et de l'autre sont très différentes). Nous définissons donc notre propre configuration de mannequin à partir de volumes configurables indépendants, et parfaitement corrélés aux mouvements de l'opérateur.

Nous commençons par définir la structure squelettique. La partie développement est directement réalisée dans l'environnement logiciel. La morphologie des membres est inspirée du modèle géométrique du corps humain conçu par Hanavan & Ernest (1964). Ce modèle considère le corps humain comme une chaîne arborescente de 15 volumes polyarticulés. Les formes irrégulières des segments sont modélisées par des formes géométriques simples et diverses (cylindres, sphères, ellipsoïdes...). Dans le cas de notre étude, deux corps supplémentaires sont ajoutés permettant de représenter les épaules du sujet. Ainsi, le mannequin est composé de 17 volumes, représentatifs des 17 marqueurs de la capture de mouvement positionnés sur le corps (Figure 6-4).



ID	Description	Position
1	Marqueur lunette tête	Sommet de la tête au niveau du front
2	Marqueur ceinture bassin	Bassin
3	Marqueur plastron tronc	Haut du dos au niveau des premières dorsales
4	Marqueur main droite	Face postérieure au niveau des métacarpes droites
5	Marqueur main gauche	Face postérieure au niveau des métacarpes gauches
6	Marqueur bras droit	Région postérieure du bras droit
7	Marqueur bras gauche	Région postérieure du bras gauche
8	Marqueur avant-bras droit	Région postérieure de l'avant-bras droit
9	Marqueur avant-bras gauche	Région postérieure de l'avant-bras gauche
10	Marqueur cuisse droite	Région antérieure de la cuisse droite
11	Marqueur cuisse gauche	Région antérieure de la cuisse gauche
12	Marqueur jambe droite	Région postérieure de l'avant-bras droit
13	Marqueur jambe gauche	Région postérieure de l'avant-bras gauche
14	Marqueur pieds droit	Région dorsale du pied droit
15	Marqueur pieds gauche	Région dorsale du pied droit
16	Marqueur plastron épaule droite	Clavicule épaule droite
17	Marqueur plastron épaule gauche	Clavicule épaule gauche

Figure 6-4. Position et description des 17 marqueurs de la capture de mouvement sur le corps de l'utilisateur.

Contrairement au modèle d'Hanavan, les volumes géométriques n'ont pas pour finalité le calcul de certains paramètres liés aux corps comme les masses, les forces, et les moments exercés. Les membres sont donc ici directement définis à partir de volumes primaires en 3D disponibles sous Unity3D, permettant une représentation géométrique cohérente des différents membres (Figure 6-5).

Pour optimiser l'immersion et permettre à l'opérateur de s'identifier au mannequin (et donc à l'utilisateur final), le squelette est texturé pour lui donner une apparence physique humaine (Figure 6-5). La structure squelettique est alors bien présente, mais non visible.

Finalement, chaque membre étant directement lié à un marqueur de la capture de mouvement, le comportement du mannequin est couplé, et **identique à celui de l'opérateur**. En effet, l'avantage d'une telle approche est que les mouvements du mannequin ne peuvent pas être perturbés par une autre cinématique, qui lui serait propre. Ceci correspond au cas où le mannequin est construit à partir d'une structure squelettique prédéfinie, gérant intrinsèquement la cinématique et les liens entre les membres. Les informations reçues par la capture de mouvement peuvent alors rentrer en conflit avec les données du mannequin. Ceci est particulièrement vrai lorsque les caractéristiques dimensionnelles de l'opérateur et du mannequin sont très différentes.

Le mannequin est donc ici lié aux caractéristiques dimensionnelles et comportementales de l'opérateur. De plus, l'interaction dans l'EV est effectuée d'un point de vue à la première personne, grâce au casque immersif.

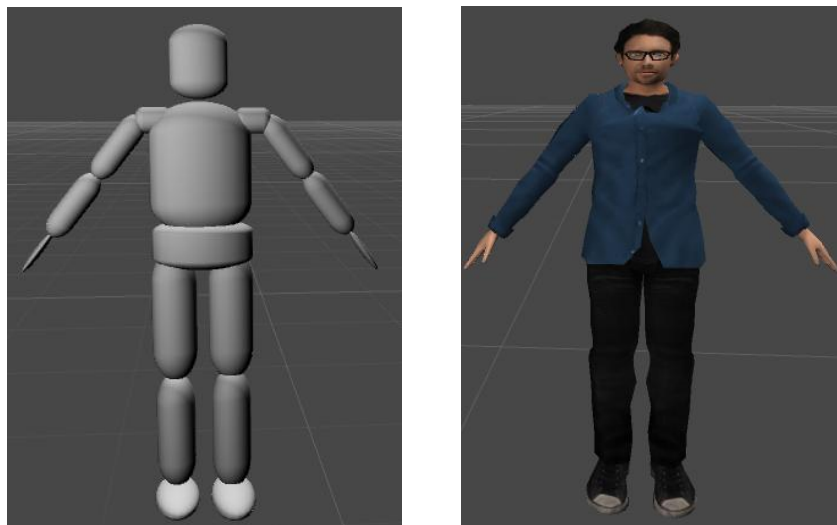


Figure 6-5. Gauche : structure squelettique du mannequin virtuel définie à partir de volumes primitifs créés avec le logiciel. Droite : mannequin texturé avec une apparence humaine réaliste.

A noter que les marqueurs étant positionnés à même la peau, ceux-ci ne représentent pas la réelle position des membres. Pour cela, un décalage (offset) est réalisé pour virtuellement repositionner les membres du mannequin (Figure 6-6). Pour correctement définir ce décalage, nous avons dans un premier temps effectué les réglages à l'aide d'un utilisateur "de référence", pour lequel nous avons mesuré la circonférence des membres. Puis la structure squelettique du mannequin virtuel a été repositionnée. A noter que cette étape a été réalisée pour permettre l'initialisation de la configuration du mannequin. La gestion de la structure squelettique du mannequin sera par la suite réalisée automatiquement (sans recourir à des mesures systématiques sur l'opérateur).

La démarche présentée a permis la définition d'un **mannequin virtuel représentatif de l'opérateur** en immersion. Il est donc désormais nécessaire de configurer ce mannequin pour qu'il puisse être anthropométriquement représentatif de l'utilisateur cible.

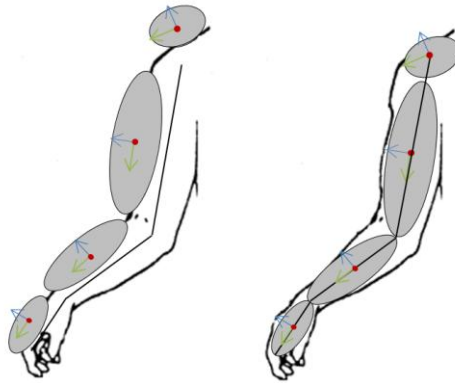


Figure 6-6. Représentation des membres virtuels du bras avant et après offset.

6.3.2 Paramétrage des membres

La Figure 6-7 représente une vision globale des éléments du dispositif développé. Le moteur de rendu 3D temps réel (Unity3D) est l'élément central du système, permettant de faire le lien entre l'opérateur et le monde virtuel, par le biais des interfaces comportementales. Les éléments de l'infrastructure logicielle et matérielle choisis nous ont permis d'interfacer le comportement de l'opérateur avec l'EV (étape 2 Figure 6-7). La ligne verte représente les éléments de l'infrastructure et le cadre violet le mannequin virtuel précédemment défini.

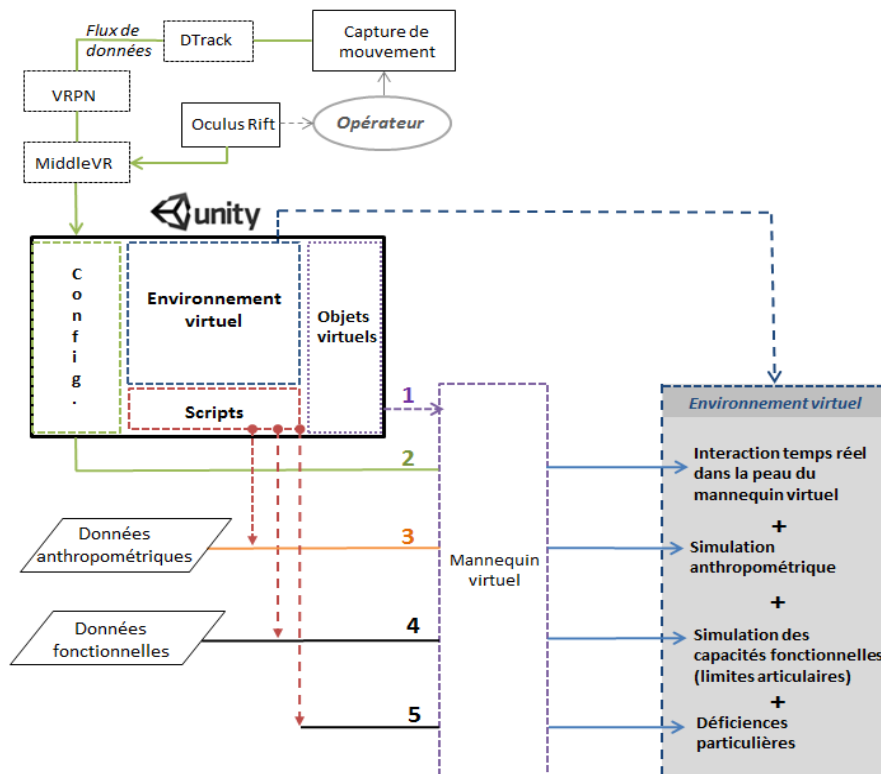


Figure 6-7. Représentation schématique de l'infrastructure et des interactions existantes entre la partie technologique, la partie logiciel, les scripts, les données d'entrées, leurs intégration dans le mannequin et la simulation en temps réel dans l'environnement virtuel.

Un mannequin virtuel a été créé et couplé avec la configuration définie, permettant à l'opérateur d'interagir en temps réel dans la peau de celui-ci, représentatif de ses caractéristiques anthropométriques (étapes 1 + 2 Figure 6-7).

Nous voulons désormais que l'opérateur en immersion puisse interagir dans la peau d'un mannequin virtuel représentatif d'un utilisateur ayant n'importe quelles caractéristiques anthropométriques (étape 3 Figure 6-7). *Nous nous intéresserons par la suite à l'intégration des capacités physiques et déficiences spécifiques de l'utilisateur (mannequin) dans la simulation (étapes 4 et 5 Figure 6-7).*

Les caractéristiques du mannequin représentent des données d'entrées, définies par les concepteurs (Figure 6-7). Ces données sont ensuite intégrées dans le mannequin et couplées aux caractéristiques de l'opérateur immergé. Pour réaliser ce couplage, il est nécessaire d'effectuer des transformations sur deux axes :

- une transformation anthropométrique : **redimensionnement** des membres en termes de longueur et circonférence + **repositionnement** dans l'espace (Figure 6-9);
- une transformation visuelle : modification du point de vue.

En effet, les membres doivent premièrement être redimensionnés pour être représentatifs du sujet cible. Ceux-ci étant pilotés indépendamment les uns des autres par la capture de mouvement, ils doivent ensuite être repositionnés par rapport au repère global du monde virtuel (représentation cohérente de la stature et de la structure squelettique du sujet).

Le point de vue à la première personne doit également être repositionné par rapport à la stature du sujet simulé. Ces transformations permettront alors un **changement d'interaction** de l'opérateur en immersion avec l'EV, ainsi qu'un **changement de point de vue** (Figure 6-8).

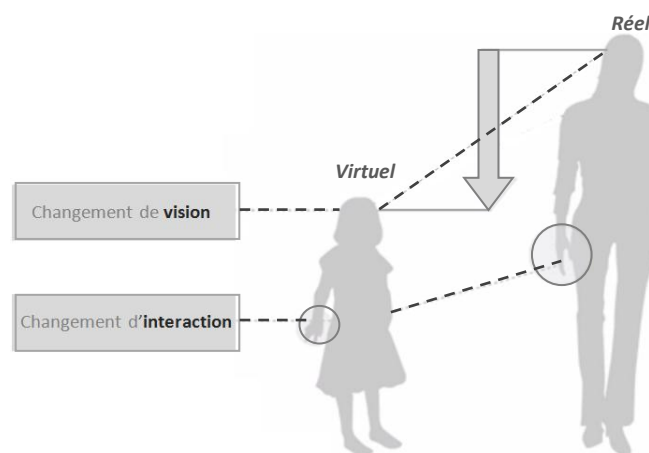


Figure 6-8. Différences majeures entre l'opérateur et le mannequin virtuel : changement de la hauteur de vision et changement de l'interaction (illustration inspirée de "Childhood Project"⁷).

Les parties suivantes détaillent ces différentes transformations.

⁷childhoodproject.org

6.3.3 Redimensionnement des membres

6.3.3.1 Longueur

Dans nos travaux de recherches, nous nous intéressons particulièrement à l'interaction des concepteurs avec le prototype et l'environnement virtuel. Ainsi, nous faisons le choix de concentrer le processus de redimensionnement sur les membres supérieurs (grandement liés dans les tâches d'atteintes, de manipulation, d'accessibilité, etc.). Seules les dimensions suivantes seront définies avec précision : longueur de bras, longueur d'avant-bras, taille de main, largeur d'épaule, hauteur d'épaule, et stature (utilisée notamment pour définir la hauteur de vision). A contrario, les données de la chaîne inférieure seront dimensionnées par proportionnalité, définies à partir de la stature (un même changement d'échelle à toute la chaîne inférieure permettra de conserver une cohérence de la cinématique et des proportions des membres).

6.3.3.2 Circonférence

La circonférence de chacun des membres doit également être prise en compte pour une construction cohérente du mannequin. Celle-ci est définie à partir de la longueur du membre, sauf pour la circonférence du buste et du tronc, définies à partir de la stature. Nous nous basons pour cela sur les corrélations entre longueurs et circonférences, définies à partir des valeurs de la base ANSUR. Une régression linéaire est appliquée pour modéliser la relation entre ces données. Par exemple, sous hypothèse de linéarité, la circonférence axillaire du bras en fonction de sa longueur est modélisée par l'équation $C_{bras} = 1,5463 \cdot L_{bras} - 17,765$. Une fois la circonférence définie, le diamètre associée est ensuite calculé (membres modélisés par des sections circulaires), et est appliqué aux membres du mannequin virtuelle. Les corrélations de chacun des membres sont présentés en Annexe D.

6.3.4 Repositionnement des membres

6.3.4.1 Chaîne supérieure

Les membres virtuels sont caractérisés par leurs positions (centre de gravité) et leurs orientation dans le repère global $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ de l'EV. Les transformations sont donc effectuées à partir de ce repère de référence. Les membres de la chaîne supérieure du mannequin virtuel sont repositionnés à partir des données de l'opérateur. Les différences dimensionnelles entre l'opérateur et le sujet sont ainsi utilisées pour définir les coefficients de transformations à appliquer (Equation 3).

$$S1 = \frac{H_{\text{épaule su}}}{H_{\text{épaule op}}}; \quad S2 = \frac{L_{\text{épaule su}}}{L_{\text{épaule op}}}; \quad S3 = \frac{L_{\text{bras su}}}{L_{\text{bras op}}}; \quad S4 = \frac{L_{\text{avant-bras su}}}{L_{\text{avant-bras op}}}; \quad S5 = \frac{L_{\text{main su}}}{L_{\text{main op}}} \quad (3)$$

Les membres de la chaîne "épaule-main" sont représentés Figure 6-9. Le point E représente la position de l'épaule virtuelle de l'opérateur dans le repère de référence, B la position du bras, A l'avant-bras, et M la main de l'opérateur. Après transformation, les membres sont représentés par E', B', A' et M' respectivement l'épaule, le bras, l'avant-bras et la main du sujet.

Les points a_1 et a_2 représentent respectivement le coude et le poignet virtuel de l'opérateur, et a'_1 et a'_2 ceux du sujet. C et C' sont les centres des épaules (Equation 4 à 9). Ces points sont définis numériquement et sont utilisés pour le repositionnement de la chaîne cinématique supérieure.

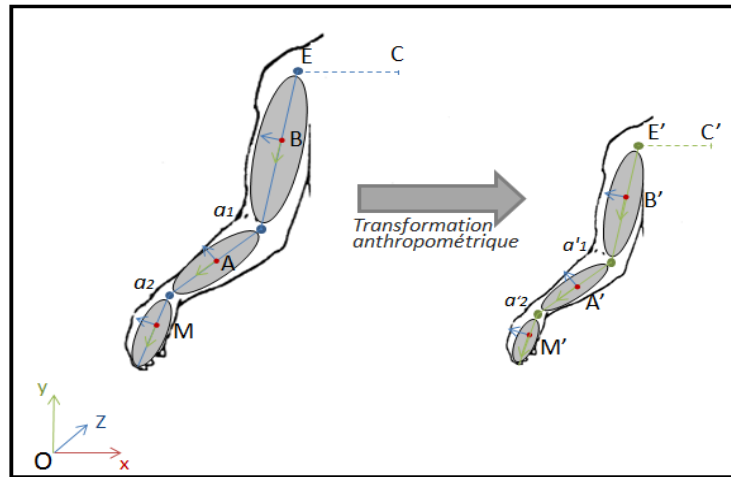


Figure 6-9. Représentation de la transformation anthropométrique à réaliser pour modifier les caractéristiques dimensionnelles du mannequin, en fonction de celles du sujet à simuler.

L'articulation de l'épaule est choisie comme élément de référence pour la reconstruction du bras (permet de respecter les liens entre les membres du corps humain). On commence donc par virtuellement repositionner l'épaule du mannequin (représentatif du sujet) par rapport à la position de l'épaule réellement mesurée par la capture de mouvement (opérateur). A partir de ce point (parent), on redéfinit la position du bras (enfant). Puis, on continue cette démarche jusqu'à la main. Ainsi, la main peut par exemple être bougée indépendamment de l'avant-bras, mais un mouvement de celui-ci engendre obligatoirement le mouvement de la main. Les nouvelles positions des membres définies dans le repère global de l'EV sont représentées par les Equations 4 à 9.

$$\overline{OC} = (\overline{OE}_d + \overline{OE}_g) \cdot 0.5 \quad (4)$$

$$\overline{OC}' = \overline{OC} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ S1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\overline{OE}' = \overline{OC}' + \overline{CE} \cdot S2 \quad (6)$$

$$\overline{OB}' = \overline{OE}' + \overline{EB} \cdot S3 \quad (7)$$

$$\overline{OA}' = \overline{OE}' + \overline{E'B}' + \overline{B'A'} + \overline{a'_1 A} \cdot S4 \quad (8)$$

$$\overline{OM}' = \overline{OE}' + \overline{E'B}' + \overline{B'A}' + \overline{A'a'_2} + \overline{a_2 M} \cdot S5 \quad (9)$$

6.3.4.2 Chaîne inférieure

La chaîne inférieure, représentée Figure 6-10, est redimensionnée proportionnellement à la stature (ou plus précisément à la hauteur d'épaule) pour une représentation cohérente et réaliste du mannequin. Ceci permet de limiter le nombre de données en entrée, sans avoir à définir toutes les caractéristiques anthropométriques de l'utilisateur. Cependant, pour une application où les dimensions inférieures seraient à simuler avec précision, des données complémentaires pourraient également être intégrées.

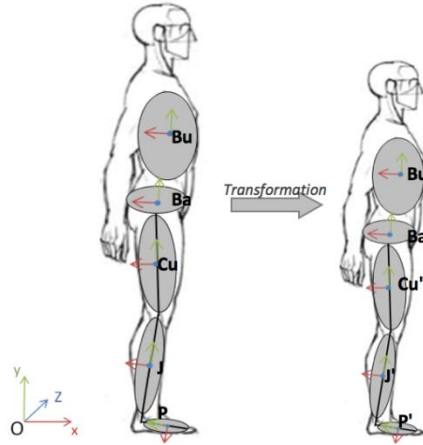


Figure 6-10. Repositionnement du tronc, du bassin, des cuisses, des jambes et des pieds du sujet par rapport à ceux de l'opérateur (modification dans le repère global).

Le point Bu représente la position (centre de gravité) du buste virtuel de l'opérateur dans le repère de référence, Ba la position du bassin, Cu la cuisse, J la jambe et P le pied. Après transformation, les membres sont représentés par Bu', Ba', Cu' et J' et P' respectivement le buste, le bassin, la cuisse, la jambe et le pied du sujet (Equation 10 à 14).

$$\overrightarrow{OBu'} = \overrightarrow{OC'} + \overrightarrow{CBu}.S1 \quad (10)$$

$$\overrightarrow{OBa'} = \overrightarrow{OBu'} + \overrightarrow{BuBa}.S1 \quad (11)$$

$$\overrightarrow{OCu'} = \overrightarrow{OBa'} + \overrightarrow{BaCu}.S1 \quad (12)$$

$$\overrightarrow{OJ'} = \overrightarrow{OCu'} + \overrightarrow{CuJ}.S1 \quad (13)$$

$$\overrightarrow{OP'} = \overrightarrow{OJ'} + \overrightarrow{JP}.S1 \quad (14)$$

6.3.4.3 Comportement des membres dans l'EV

A noter que dans le cas où l'opérateur et l'utilisateur (mannequin) ne présentent pas les mêmes caractéristiques anthropométriques, les positions des membres virtuels du sujet $\mathbf{p}_{suj}(t)$ dans l'EV (repère global) sont donc différentes de celles de l'opérateur $\mathbf{p}_{op}(t)$ (Equation 15). Il en va donc de même pour les vitesses et accélérations des membres (Equation 16 et 17).

$$\mathbf{p}_{op}(t) \neq \mathbf{p}_{suj}(t) \quad (15)$$

$$\mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{p}}(t) = \frac{d\mathbf{p}(t)}{dt}; \quad \mathbf{v}_{op}(t) \neq \mathbf{v}_{suj}(t) \quad (16)$$

$$\mathbf{a}(t) = \dot{\mathbf{v}}(t) = \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt}; \quad \mathbf{a}_{op}(t) \neq \mathbf{a}_{suj}(t) \quad (17)$$

Les mouvements de l'opérateur étant transposés à ceux du mannequin, les rotations des membres virtuels du sujet $\mathbf{R}_{suj}(t)$ dans le repère global sont quant à elles identiques aux rotations des membres de l'opérateur $\mathbf{R}_{op}(t)$ (Equation 18).

$$\mathbf{R}_{op}(t) = \mathbf{R}_{suj}(t) \quad (18)$$

6.3.5 Corpulence du sujet

Pour évaluer au mieux l'activité future de l'utilisateur final, nous pensons qu'il est également important de prendre en compte la corpulence de celui-ci. Nous proposons ainsi de modéliser le mannequin virtuel par trois types de morphologies : corpulence basse, moyenne, et haute. Pour cela, nous nous basons sur l'utilisation de l'Indice de Masse Corporelle (WHO, 1995) définie par l'équation 19.

$$IMC = \frac{\text{Poids (kg)}}{\text{Stature}^2 (\text{m}^2)} \quad (19)$$

D'après WHO (2000, 2004), une corpulence "normale" (moyenne) est définie par un IMC compris entre 18.5 et 24.9. Une faible corpulence correspond à une situation de maigreur avec un IMC compris 16 et 18.49. Une corpulence forte correspond à un surpoids, avec un IMC entre 25 et 29.9. Nous nous basons sur ces données, pour modéliser la corpulence du mannequin. Des coefficients, basés sur ces données, sont définis pour modifier la circonférence des membres. Ils sont définis à partir du ratio entre l'IMC voulu et l'IMC de "référence", correspondant à un IMC "normal" égal à 25 kg.m⁻². Ainsi, un individu avec une corpulence faible sera défini par un ratio de 18.5/25=0.74, considéré en situation de maigreur; un ratio de 25/25=1 définira une corpulence moyenne; un ratio de 30/25=1.2 une corpulence forte, considérant un surpoids.

Nous avons fait le choix de permettre ainsi une modification rapide et une simulation assez réaliste de la corpulence, permettant d'étudier le potentiel impact d'une différence de morphologie durant les évaluations immersives. Cette procédure ne permet cependant qu'une modélisation approximative de la morphologie du mannequin. Une simulation plus précise devrait notamment déterminer indépendamment l'influence du poids sur la circonférence de chaque membre.

6.3.6 Modification du point de vue immersif

Les transformations précédemment effectuées changent l'interaction avec l'EV. Pour une interaction réaliste, le point de vue, c'est-à-dire la hauteur de vision, doit également être modifiée.

Comme présentée paragraphe 6.2.2.1, la vision à la première personne est réalisée à l'aide d'un casque immersif permettant de capter et restituer les mouvements de rotation de la tête. Pour une vision de l'environnement virtuel à 6 degrés de liberté (3ddl en rotation + 3ddl translation), il est nécessaire de capter la position de la tête dans l'espace. Pour cela, nous utilisons un marqueur optique (lunettes) positionné sur la tête de l'opérateur, permettant de définir la position de la tête, et ainsi les mouvements du corps dans l'EV (Figure 6-11). Cette position est retranscrite dans le casque immersif, permettant de gérer la vision à la première personne. La modification de la hauteur virtuelle de la camera permet le changement de point de vue. Pour cela, on se base sur la différence de stature entre le sujet et l'opérateur. Les mouvements de la tête du mannequin sont identiques à ceux de l'opérateur. Seule la position par rapport à l'axe \vec{y} du repère global est modifiée, simulant virtuellement la différence de stature (Figure 6-12). Il est important de noter que ce changement de point de vue reste cohérent, que ce soit en statique ou en dynamique. Par exemple, l'opérateur se tenant debout dans le monde réel, aura un retour visuel correspondant à la stature du mannequin simulé, se tenant également debout dans l'EV. Si maintenant l'opérateur positionne sa tête au niveau du sol, la vision perçue dans le casque immersif correspondra également à celle du mannequin, située au niveau du sol de l'EV. Cette particularité est également vraie pour la chaîne cinématique

des membres supérieurs. En effet, quelles que soient les caractéristiques du sujet simulé, si l'opérateur touche par exemple son épaule ou le sol dans le monde virtuel, sa main touchera de la même manière son épaule ou le sol dans le monde réel. Cette caractéristique est donc très importante car elle permet de renforcer la cohérence de simulation, et la notion de présence associée.

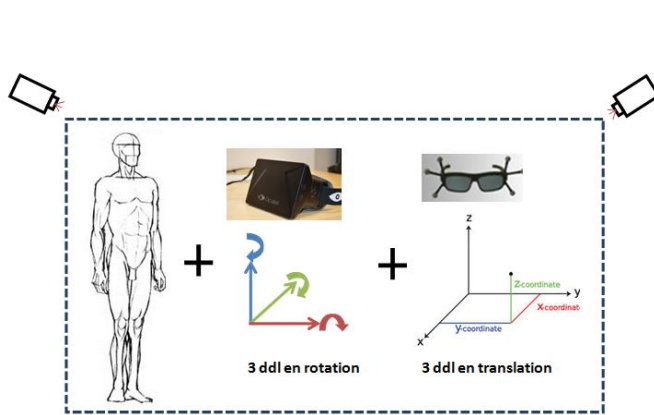


Figure 6-11. Couplage du casque immersif et d'un marqueur optique pour une vision de l'environnement virtuel à 6 ddl.

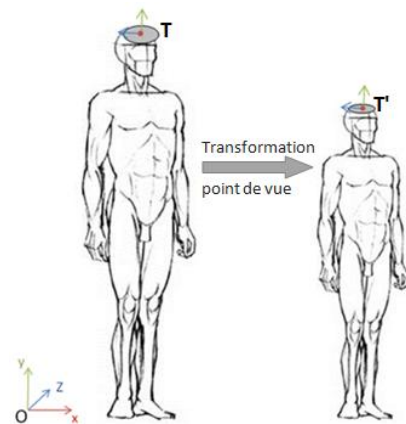


Figure 6-12. Position de la tête de l'opérateur (\overline{OT}) et du mannequin (\overline{OT}') dans le repère global.

6.4 Résultats obtenus

6.4.1 Visualisation des résultats obtenus

Pour représenter les résultats obtenus, nous avons inséré le mannequin dans une scène réaliste représentative d'une phase d'évaluation immersive d'un prototype virtuel (représenté ici par une cuisine équipée). Les Figure 6-13 et Figure 6-14 représentent l'opérateur portant la capture de mouvement, le mannequin virtuel contrôlé, ainsi que la vision à la première personne du mannequin, perçue au travers du casque immersif. L'évaluation immersive est donc réalisée par l'opérateur, mais avec une **interaction et un point de vue représentatifs de l'utilisateur final**.

Nous voyons que l'immersion visuelle complète réalisée par le casque immersif est, dans nos travaux, essentielle pour une simulation virtuelle robuste. En effet, l'opérateur interagissant dans la peau d'un mannequin ayant des caractéristiques anthropométriques différentes des siennes, les cinématiques des membres virtuels et réels ne sont pas identiques. Ainsi, pour que l'opérateur puissent **s'identifier pleinement au mannequin simulé**, et pour ne pas rompre l'immersion (et la présence) induite, celui-ci ne doit pas percevoir de retours visuels venant du monde réel. En effet, ceci engendrerait des informations contradictoires, et une incohérence de la simulation. Il serait par exemple très difficile de simuler de façon réaliste une différence de stature, tout en ayant un retour visuel réel sur son propre corps (comme dans le cas de l'utilisation d'un CAVE par exemple). Cette immersion visuelle complète du monde extérieur permet donc une cohérence de la simulation, et peut donc être utilisée pour **modifier de façon naturelle et inconsciente le comportement de l'opérateur** (nous verrons une autre application possible de cette propriété dans le chapitre IV).

Pour vérifier et analyser ce changement d'interaction engendré par le dispositif lors des phases immersives, nous proposons maintenant d'étudier le comportement (implication physique) de l'opérateur dans l'EV, en fonction du mannequin simulé.

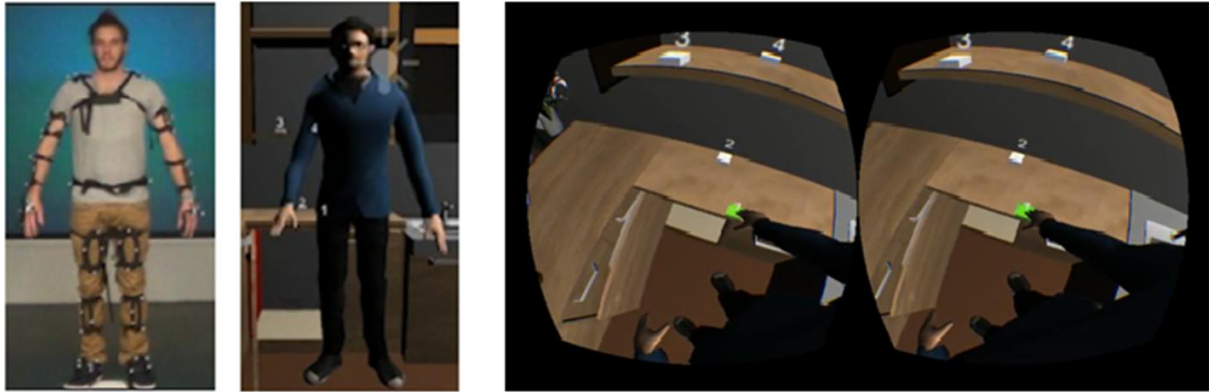


Figure 6-13. Interaction dans la peau d'un mannequin dimensionnellement représentatif de l'opérateur. De gauche à droite : opérateur, mannequin virtuel, vision immersive représentative à la première personne.

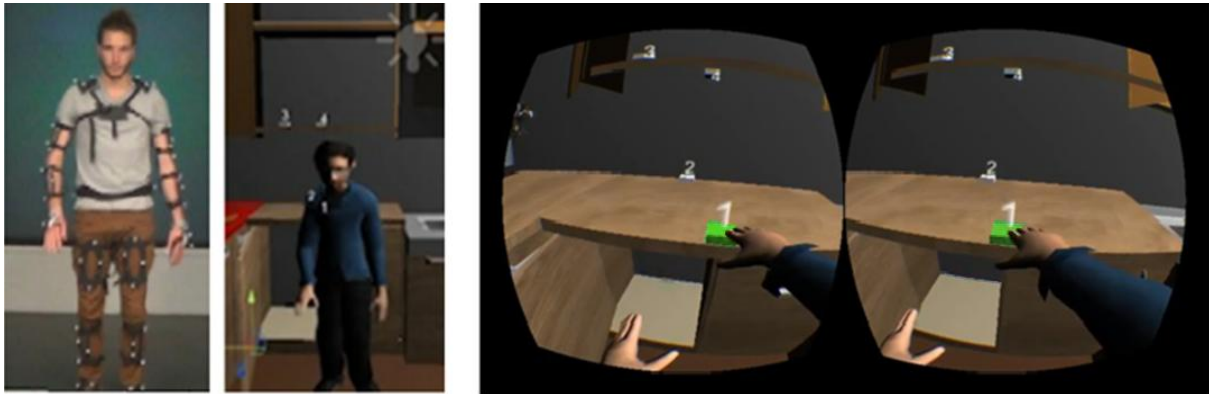


Figure 6-14. Interaction dans la peau d'un mannequin virtuel ayant des caractéristiques anthropométriques différentes de l'opérateur. De gauche à droite : opérateur, mannequin virtuel, vision immersive à la première personne représentative du point de vue du mannequin dans l'environnement virtuel.

Ces résultats sont visibles sous format vidéo au lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=wNvd310Bpdw>.

6.4.2 Influence du dispositif sur l'implication physique réelle de l'opérateur

Une étude test a été mise en place afin de mettre en évidence **l'influence de l'infrastructure immersive sur les mouvements réellement effectués par l'opérateur**, en fonction des caractéristiques anthropométriques du mannequin simulé. L'étude consiste en l'atteinte de plusieurs points situés à différentes hauteurs. **Premièrement, les atteintes sont réalisées par un opérateur dans le monde réel**, par le biais d'une structure physique. Celle-ci est constituée de 3 points d'atteintes respectivement situées à 0.7m, 1.4m, et 1.65m du sol. L'opérateur équipé de la capture de mouvement se positionne devant la structure bras relâchés, puis touche chacun des points en tenant la position d'atteinte pendant quelques secondes, avant de revenir à une position de repos (bras relâchés).

L'expérience est ensuite modélisée virtuellement, et l'opérateur immergé réalise les tests d'atteintes dans la peau de mannequin avec différentes anthropométries. Pour évaluer le comportement de l'opérateur, les mouvements de celui-ci sont enregistrés à l'aide de la capture de mouvement. Ces données, enregistrées à une fréquence de 60Hz, sont stockées sous forme de fichier texte contenant les informations concernant la position et l'orientation de chacun des capteurs en fonction du temps. Un programme développé sous le logiciel Matlab permet à posteriori de lire ces données et de reconstruire les mouvements effectués par les différents membres. La position et l'orientation des membres sont exprimés par rapport au repère de référence correspondant au niveau du sol. Les données sont également intégrées dans une représentation numérique permettant de visualiser les mouvements enregistrés. Les données présentées ont été définies à partir d'un programme basée sur le modèle de mannequin Hanavan modifié (Hanavan & Ernest 1964), et préalablement développé (environnement Matlab) au sein de notre laboratoire.

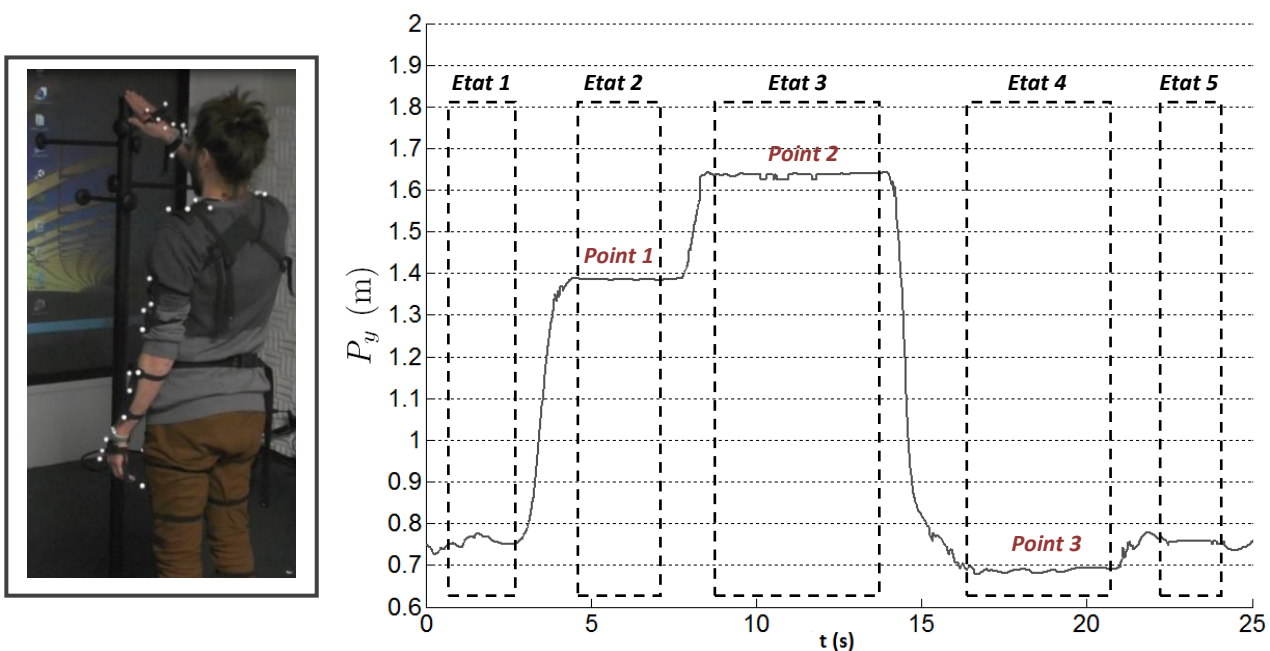


Figure 6-15. Photo de l'atteinte du point haut de la structure par l'opérateur (gauche) et tracé de l'évolution de la position de la main $P_y(m)$ en fonction du temps (droite) pour le test réel.

Nous nous intéressons ici à la position de la main de l'opérateur, en fonction du temps, et par rapport à l'axe vertical du repère de référence (composante \vec{y}). La variable $P_y(m)$ représente l'évolution de la hauteur de la main dans le monde réel, en fonction du temps. Il était demandé à l'opérateur de toucher successivement chacun des points, tout en maintenant la position d'atteinte pendant quelques secondes. La Figure 6-15 représente l'évolution de la hauteur de la main droite lors de la réalisation du test en situation réelle. Les mouvements effectués peuvent être séparés en 4 phases et 5 états distincts. Le premier état représente la position initiale de la main (bras au repos). Après une phase d'ascension, la main se stabilise à l'état 2, correspondant au premier point situé à 1.4m. Ensuite, la main s'élève pour atteindre le point 2 situé à 1.65m (état 3). La main redescend jusqu'au point situé à 0.7m, puis reprend sa position initiale correspondant à une situation de repos. La Figure 6-15 montre que les valeurs de $P_y(m)$ pour les états 2, 3, et 4 correspondent bien aux hauteurs de points de la structure (une légère différence peut être observée, due au positionnement du capteur sur la main et aux mouvements d'atteintes effectués).

Les tâches d'atteintes sont ensuite réalisées avec l'opérateur immergé, interagissant dans l'EV dans la peau d'un mannequin ayant les mêmes caractéristiques que lui. La Figure 6-16 représente toujours l'évolution de la hauteur de la main de l'opérateur dans le monde réel. Nous pouvons constater que le profil de courbe correspond à celui obtenu Figure 6-15. Les valeurs de $P_y(m)$ pour les différents états sont identiques (aux imprécisions près, dues aux légères variations de positions du marqueur de la main entre chaque test). Autrement dit, le comportement effectué par l'opérateur dans le monde virtuel est semblable à celui réalisé par le test réel. **La modélisation virtuelle (environnement et mannequin) est donc dimensionnellement et cinématiquement fidèle à l'expérience réelle.**

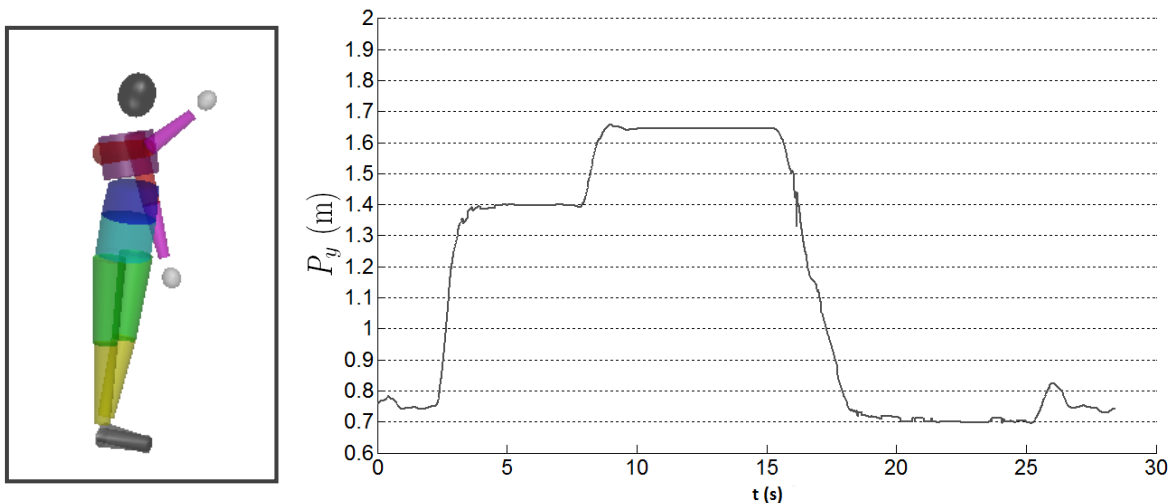


Figure 6-16. Représentation numérique de l'atteinte du point haut de la structure (gauche) et évolution de la position de la main $P_y(m)$ dans le monde réel, en fonction du temps (droite) lorsque l'opérateur interagit virtuellement dans la peau d'un mannequin ayant les mêmes caractéristiques anthropométriques que lui.

La Figure 6-17 représente l'évolution de la position de la main $P_y(m)$, lorsque l'opérateur interagit virtuellement dans la peau d'un mannequin représentatif du 5ième percentile femme. Nous pouvons observer que les valeurs de $P_y(m)$ au niveau des états 1 et 5 sont identiques pour tous les tests (Figure 6-15 à 18). Ces états représentent la position des mains pour une position neutre (lorsque les bras sont au repos). Il est donc cohérent que $P_y(m)$ soit constant sur ces parties. Pour les autres parties de la courbe, le comportement de l'opérateur est différent que celui des cas précédents. Avec des caractéristiques anthropométriques (et une hauteur de vision) moins importantes, l'implication physique de l'opérateur devient supérieure pour pouvoir atteindre les points. Ainsi, l'atteinte du point 2 (située à 1.65m du sol), correspond pour l'opérateur à atteindre un point situé à plus de 1.9m. Comme on peut le voir sur la représentation numérique Figure 6-17, celui-ci est obligé de lever le bras au-dessus de sa tête et de lever les pieds pour toucher le point 2. On voit également que les amplitudes entre chaque état sont plus importantes (environ 1.15m au lieu de 0.95m par exemple entre les états 3 et 4). L'opérateur interagissant dans la peau d'un mannequin ayant des caractéristiques anthropométriques différentes, les modèles cinématiques des membres réels et virtuels ne sont pas identiques. L'amplitude d'atteinte du mannequin est plus faible, et l'opérateur doit réaliser des mouvements plus amples pour atteindre le point 2. Le constat inverse peut être fait pour un mannequin virtuel ayant des caractéristiques anthropométriques plus importantes que l'opérateur. On peut observer sur la Figure 6-18 que dans ce cas, le point 2 correspond à une hauteur

de main réelle $P_y(m) \approx 1.5m$ au lieu de $P_y(m) \approx 1.65m$. De même, avec cette configuration, l'opérateur est obligé de se baisser légèrement pour atteindre le point 3 de la structure.

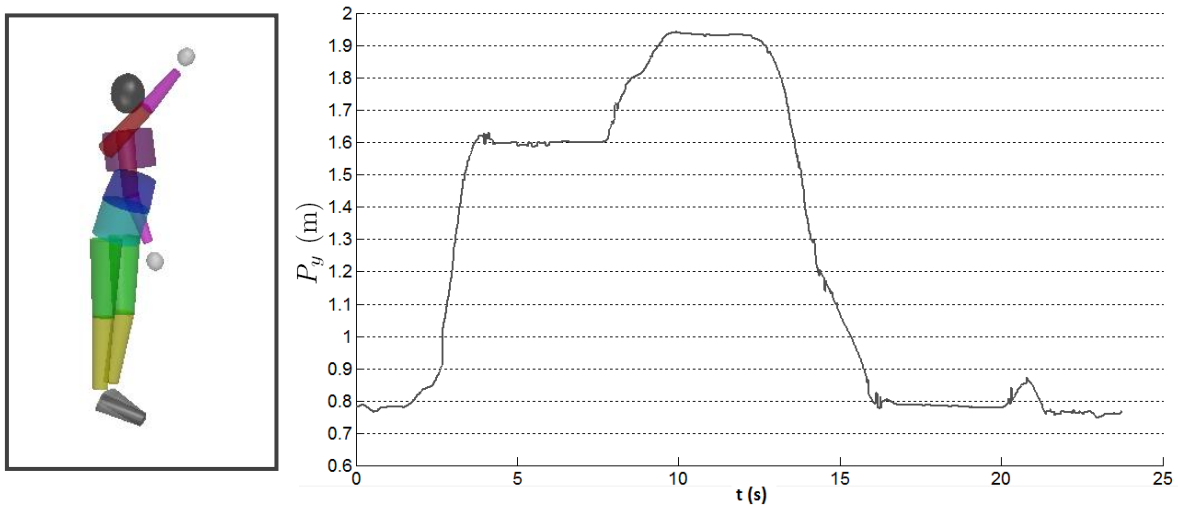


Figure 6-17. Représentation numérique de l'atteinte du point haut de la structure (gauche) et évolution de la position de la main $P_y(m)$ dans le monde réel, en fonction du temps (droite) lorsque l'opérateur interagit virtuellement dans la peau d'un mannequin représentatif du 5ième percentile femme (données ANSUR).

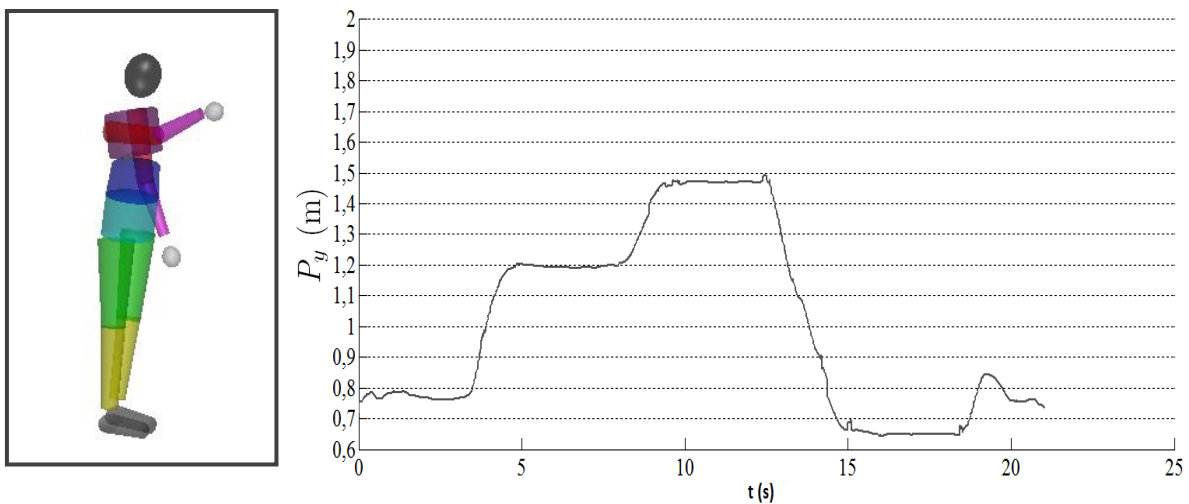


Figure 6-18. Représentation numérique de l'atteinte du point haut de la structure (gauche) et évolution de la position de la main $P_y(m)$ dans le monde réel, en fonction du temps (droite) lorsque l'opérateur interagit virtuellement dans la peau d'un mannequin représentatif du 95ième percentile Homme (données ANSUR).

Le dispositif mis en place permet donc à l'opérateur de naturellement changer son comportement pour interagir avec l'EV d'une façon plus représentative de l'utilisateur cible. Il devient **acteur représentatif** de l'utilisateur (ou tout du moins de ses caractéristiques anthropométriques). L'activité simulée n'est donc plus celle de l'opérateur, et devient comparable à celle du sujet. Il peut ainsi réaliser des analyses plus réalistes, et **mettre en évidence des problèmes liés à l'usage** qu'une phase immersive « classique » n'aurait pas forcément permis de déceler. L'implication physique induite par le dispositif lui permet de **mieux ressentir les contraintes liées à l'activité et aux caractéristiques physiques du sujet**, en pilotant directement le modèle cinématique de l'utilisateur.

Après les aspects anthropométriques du mannequin (étapes 3 Figure 6-7), nous nous intéressons désormais à la considération des données physiques de celui-ci, c'est-à-dire liées aux postures et comportements adoptés dans l'EV.

6.5 Intégration des données physiques spécifiques

L'objectif est désormais de prendre de compte les données liées aux capacités fonctionnelles du sujet. Nous proposons dans un premier temps de considérer l'activité de l'utilisateur à partir de données ergonomiques normées, permettant d'analyser l'usage sur des bases normatives. Dans un second temps, nous proposons d'étudier l'intégration et la simulation de limitations fonctionnelles et déficiences physiques spécifiques du sujet (étapes 4 et 5 Figure 6-7).

6.5.1 Données ergonomiques

Le dispositif développé fournit des analyses subjectives de l'usage, en permettant à l'opérateur d'interagir naturellement et manière réaliste dans la peau d'un mannequin virtuel, représentatif de l'utilisateur final. Les acteurs de la conception peuvent ainsi mieux appréhender et simuler l'activité de l'utilisateur. En accord avec certains auteurs, nous pensons qu'il est également nécessaire de compléter ces analyses avec des données quantitatives, permettant une évaluation plus objective de l'activité (Shaikh & Jayaram 2004; Mahdjoub 2007). L'utilisation d'outils d'analyses ergonomiques, directement intégrés à l'EV, donne les moyens de mieux appréhender les préconcepts étudiés en RV, de compléter l'étude de la simulation de l'usage, et d'aider à évaluer les futures contraintes liés à l'activité. En effet, ces outils d'analyse sont le plus souvent cantonnés aux outils ergonomiques classiques (simulation par mannequin numériques, etc.), sans permettre une interopérabilité avec les simulations virtuelles. Les phases immersives (évaluations subjectives) et les analyses ergonomiques quantitatives sont ainsi généralement dissociées (Jayaram et al. 2006; Whitman et al. 2004). Sur la base de plusieurs travaux (Chryssolouris et al. 2000; Shaikh et al. 2003), nous proposons d'intégrer des considérations ergonomiques quantitatives durant les phases immersive.

6.5.1.1 Approche

De nombreuses approches existent dans la littérature permettant d'analyser les postures et tâches réalisées par un opérateur. Nous pouvons par exemple citer l'équation révisée de NIOSH (NIOSH 1991; Waters et al. 1993), les méthodes OREG (Aptel et al. 2000), OCRA (Occhipinti 1998), OWAS (Karhu et al. 1977), OSHA (OSHA 1999), ou encore RULA (McAtamney & Corlett 1993). Etudiant l'activité de l'utilisateur dans l'EV, nous faisons le choix de concentrer notre analyse sur des données ergonomiques liées à la posture de l'individu, et notamment sur les membres supérieurs. Pour cela, nous nous inspirons de la méthode RULA.

RULA est une méthode développée pour l'évaluation ergonomique d'environnements, et plus particulièrement de postes de travail (McAtamney & Corlett 1993). Cette méthode permet de quantifier les troubles des membres supérieurs liés à une tâche et un environnement. L'étude des amplitudes articulaires est le facteur prépondérant dans cet outil. Celui-ci ne nécessite aucun équipement spécial et permet de fournir une évaluation rapide des postures du cou, du tronc et des membres supérieurs, ainsi que des charges externes subies par le corps. La méthode classique utilise des schémas de postures du corps et trois tables de notation pour fournir une évaluation de l'exposition aux facteurs de risque. **Une note est définie en fonction de chaque configuration articulaire. Les scores obtenus correspondent au niveau d'inconfort lié à la posture.**

Nous nous concentrons sur les configurations articulaires du bras, de l'avant-bras, de la main, et du tronc, et des niveaux de confort associés définis dans la méthode RULA.

A noter que cette approche n'a pas pour vocation de remplacer les analyses pouvant être classiquement effectuées. Nous nous inspirons des zones de confort définies par cette méthode pour intégrer des considérations ergonomiques normées. Ainsi, certaines données telles que la posture du cou, la répétition des postures, ou les charges appliquées (principalement utilisées lors d'étude de postes de travail), initialement présentes dans la méthode, ne seront pas étudiées ici.

6.5.1.2 Configuration articulaires

Nous nous basons donc sur les notes d'inconforts correspondantes aux configurations articulaires des membres, définis dans la méthode RULA. Pour calculer ces notes, le corps est divisé en segments. Les mouvements du bras, de l'avant-bras, et du poignet sont évalués et notés à partir de différents travaux, définis dans McAtamney & Corlett (1993). Les zones et les scores associés sont représentés Figure 6-19.

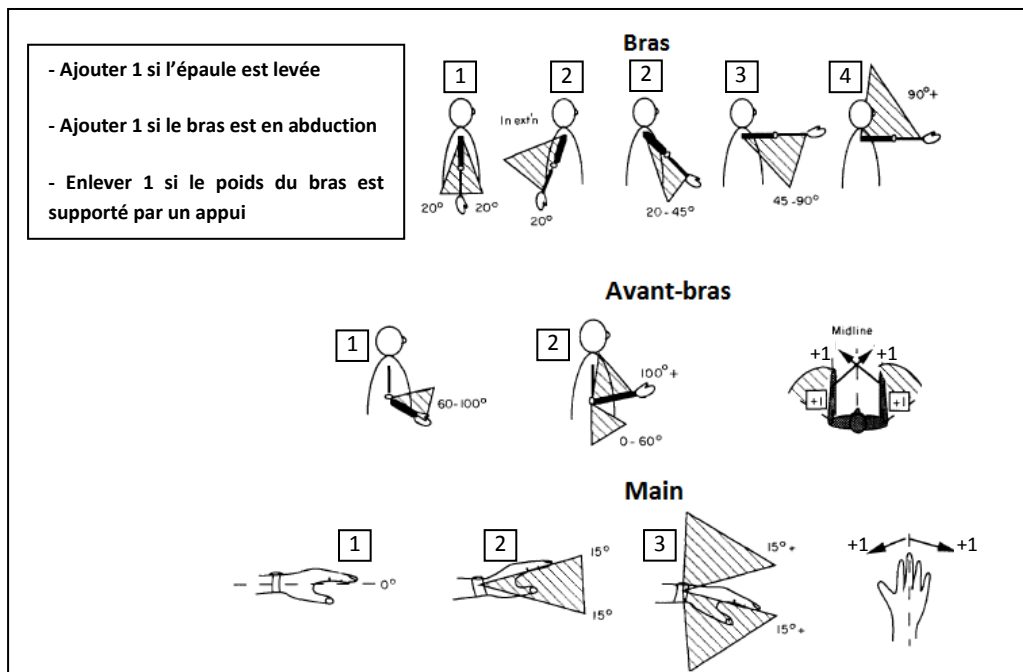


Figure 6-19. Scores liés à la posture des membres supérieurs. Le bras est défini par la configuration articulaire de l'épaule, l'avant-bras par la configuration du coude, et la main par le poignet (McAtamney & Corlett 1993).

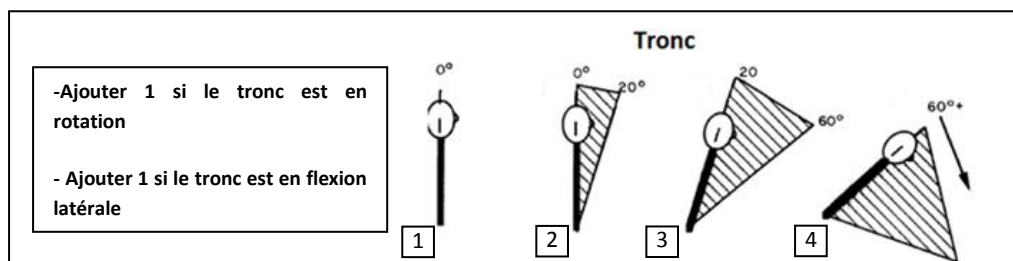


Figure 6-20. Scores liés à la posture du tronc (McAtamney & Corlett 1993).

Chaque segment est représenté dans le plan sagittal. Si une posture ne peut entièrement être représentée dans ce plan - par exemple lors d'une abduction- le score est adapté par l'ajout d'une

note supplémentaire représentant cette configuration. Les zones définies pour le tronc sont représentées Figure 6-20.

6.5.1.3 Définition des configurations articulaires du mannequin

Les marqueurs rigides fixés sur chaque segment supérieur fournissent les configurations spatiales (dans le système de coordonnées global) des mains, des avant-bras, des bras, des épaules, de la tête, du tronc et du bassin. Les repères liés à ces marqueurs sont utilisés pour définir les référentiels propres à chaque segment (Figure 6-21). Ces référentiels étant fixés aux segments au cours du mouvement, ils permettent de définir ponctuellement un système de coordonnées locales se déplaçant avec le corps auquel il est attaché. Ainsi, les configurations sont définies à partir de la position et de l'orientation des membres virtuels les uns par rapport aux autres (définition des angles articulaires inspirée de Delisle et al. (2002) et Grood & Suntay (1983)). Le développement est réalisé en C# utilisant l'interface dédiée de Unity3D.

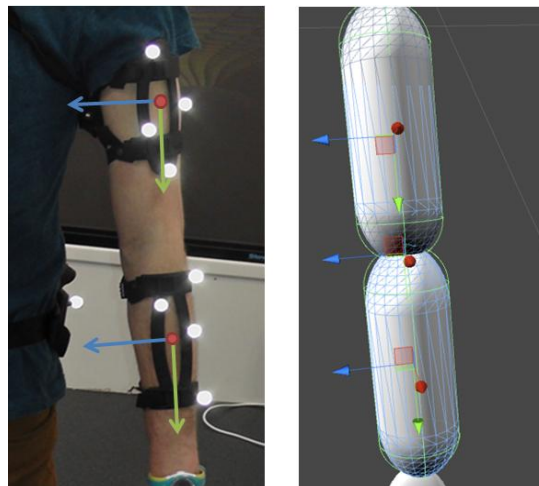


Figure 6-21. Gauche: axes liés aux marqueurs du bras et de l'avant-bras. Droite: axes liés aux membres virtuels (et à l'articulation du coude) du sujet.

Nous étudions la configuration articulaire au niveau du coude (Figure 6-22). La flexion du coude (α_c) est définie par l'angle entre les axes longitudinaux du bras (L_B) et de l'avant-bras (L_{AB}) autour de l'axe transverse du bras (T_B). Ces axes sont directement définis à partir des repères liés aux marqueurs. La pronation/supination est définie (Figure 6-23) par l'angle entre les axes transverses du bras (T_B) et de l'avant-bras (T_{AB}) autour de l'axe longitudinal de l'avant-bras (la pronation complète correspond à un angle de 0°). La position de l'avant-bras par rapport à l'épaule est analysée pour évaluer si le score postural doit être augmenté de 1 ou non (voir Figure 6-19).

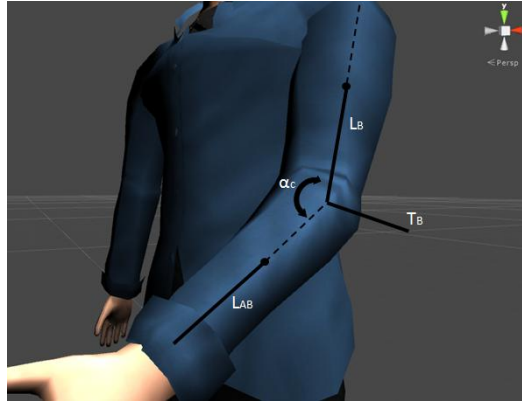


Figure 6-22. Représentation des axes longitudinaux du bras (L_B) et de l'avant-bras (L_{AB}), et de l'axe transverse du bras (T_B) pour la définition de l'angle de flexion au coude (α_c).

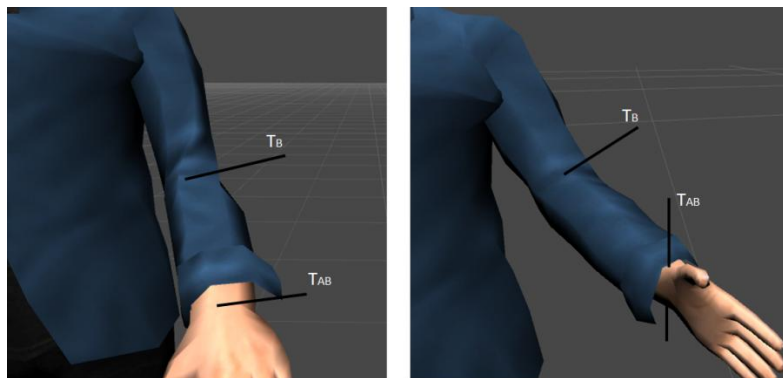


Figure 6-23. Représentation des axes transverse du bras (T_B) et de l'avant-bras (T_{AB}) en pronation (gauche) et en position neutre (droite).

Les mouvements du bras sont évalués en mesurant les configurations articulaires au niveau de l'épaule (Figure 6-24). La flexion/extension de l'épaule (α_e) est définie par l'angle entre les axes longitudinaux de l'épaule (L_E) et du bras (L_B) autour de l'axe transverse de l'épaule (T_E), la flexion étant positive. L'abduction de l'épaule (β_e) correspond à l'angle entre l'axe longitudinal du bras (L_B) et l'axe longitudinal de l'épaule (L_E) autour de l'axe sagittal de l'épaule (S_E). La méthode préconise d'augmenter le score de 1 dès que le bras est en abduction, sans définir de zones particulières. Ainsi, le bras sera considéré en abduction à partir d'un angle α_e supérieur à 20° .

A noter : le repère de l'épaule est lié au marqueur positionné au niveau de la clavicule de l'opérateur. Pour que celui-ci serve de repère local, il doit être fixe par rapport au bras pour mesurer correctement l'angle d'abduction effectué. Nous considérons que ce marqueur peut être utilisé en tant que référentiel jusqu'à une abduction de 90° . En effet, pour un angle inférieur à 30° , le déplacement de la clavicule peut être considéré comme négligeable (abduction définie pour 5/6 par la scapulo-humérale)(Dufour & Pillu 2007). Cependant, entre 90° et 150° , l'abduction de l'épaule entraîne une élévation de la clavicule (abduction définie pour 1/3 par une abduction scapulo-humérale et pour 2/3 par une abduction scapulo-thoracique). Le capteur positionné sur la clavicule se déplace alors par le biais d'une rotation de son axe longitudinal autour de son axe sagittal. L'épaule ne peut donc plus correctement être utilisée en tant que référentiel. Au-dessus de 150° , l'abduction est définie par une inclinaison latérale du rachis, entraînant également un déplacement de l'épaule. Cependant, l'épaule peut tout de même être choisie comme référentiel, car l'abduction doit ici être seulement détectée, et non précisément mesurée.

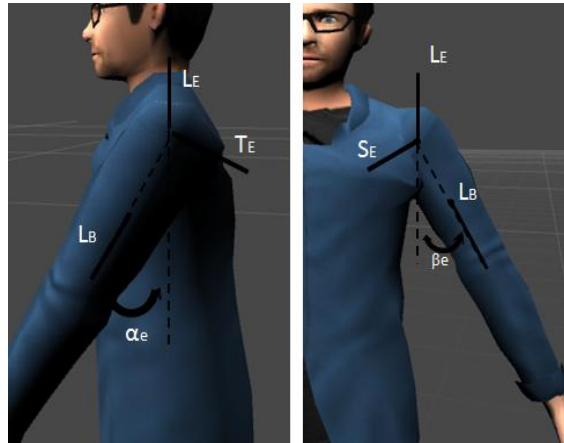


Figure 6-24. Gauche: axes utilisés pour la définition de l'angle de flexion/extension de l'épaule (α_e). Droite : axes utilisés pour la définition de l'abduction de l'épaule (β_e).

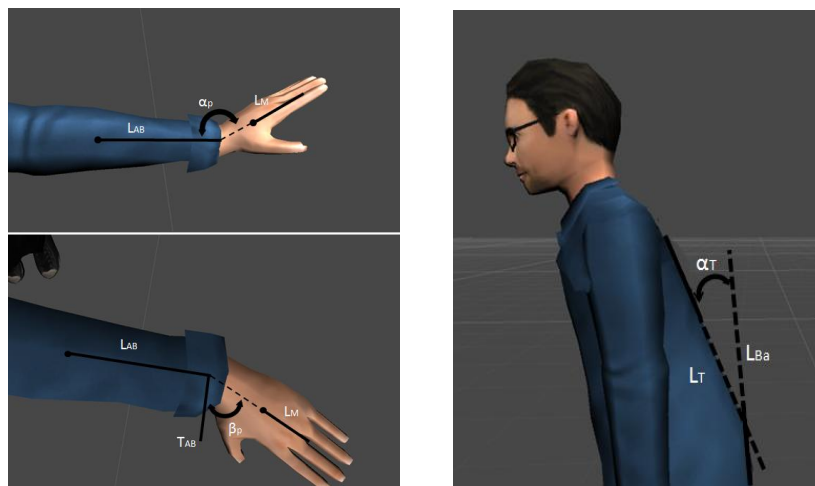


Figure 6-25. Gauche : axes utilisés pour la définition de l'angle de flexion (α_p) de déviation (β_p) de la main. Droite : axes utilisés pour la définition de l'angle de flexion du tronc (α_T).

Les zones de la main sont évaluées à partir des configurations articulaires du poignet (Figure 6-25). La flexion/extension du poignet (α_p) est définie par l'angle entre les axes longitudinaux de la main (L_M) et de l'avant-bras (L_{AB}) autour de l'axe transverse de l'avant-bras (T_{AB}), l'extension étant positive. Une déviation radiale/cubitale engendre une augmentation de 1 du score postural (Figure 6-19). Cette déviation (β_p) est définie par l'angle entre l'axe longitudinal de la main (L_M) et l'axe transverse de l'avant-bras (T_{AB}) autour de l'axe sagittal de l'avant-bras, la déviation cubitale étant positive. La pronation/supination du poignet est définie comme étant la même que celle de l'avant-bras, définie par l'angle entre les axes transverses du bras (T_B) et de l'avant-bras (T_{AB}) autour de l'axe longitudinal de l'avant-bras (L_{AB}).

La flexion extension du tronc (α_T) est définie par l'angle entre les axes longitudinaux du bassin (L_{Ba}) et du tronc (L_T) autour de l'axe traversé lié au bassin (T_{Ba}), l'extension étant positive (Figure 6-25). La rotation du tronc est définie entre les axes transverses du tronc (T_T) et du bassin (T_{Ba}) autour de l'axe longitudinal du bassin (L_{Ba}). La flexion latérale du tronc est définie à partir des axes longitudinaux du tronc (L_T) et du bassin (L_{Ba}) autour de l'axe sagittal du bassin (S_{Ba}). Le tronc est arbitrairement défini en rotation à partir d'un angle détecté de 7° , l'amplitude thoracique moyenne allant de 0 à 35°

environ (Vanneuille et al. 1980). De même, la flexion latérale est définie à partir d'un angle détecté de 5°, l'amplitude de mouvement allant de 0 à 30°.

6.5.1.4 Définition des indicateurs

Le score total lié à la posture des membres supérieurs (Bras, Avant-bras et poignet) est calculé à partir des notes obtenues pour chaque membre, en utilisant la table présentée dans McAtamney & Corlett (1993) (Annexe E). Ces données **sont calculées en temps réel**, permettant ainsi de fournir des **informations de manière continue** sur la posture adoptée par le sujet virtuel. Les scores posturaux obtenus pour chaque membre (chaîne supérieure + tronc) sont dynamiquement visualisés sur le mannequin, par une coloration des segments concernés. Pour limiter le nombre d'informations visuelles disponibles, seule une visualisation des scores les plus importants est proposée (zones jaune, orange et rouge). La correspondance entre les données de l'analyse RULA et les segments colorés est définie Tableau 6-1. La coloration des segments est définie à partir du code couleur représenté Tableau 6-2 (inspirée de Dassault-Systemes (2000)).

Tableau 6-1. Membres colorés en fonction des configurations articulaires.

Configuration RULA	Données d'entrée d'analyse	Segment coloré
Bras	Configurations articulaires au niveau de l'épaule	Bras
Avant-bras	Configurations articulaires au niveau du coude	Avant-bras
Poignet	Configurations articulaires au niveau du poignet	Main
Tronc	Configurations articulaires entre le tronc et le bassin	Buste

Tableau 6-2. Couleurs des membres en fonction des scores posturaux individuels.

Membre	Score postural	Couleur associée au score					
		1	2	3	4	5	6
Bras	de 1 à 6	Vert	Vert	Jaune	Jaune	Rouge	Rouge
Avant-bras	de 1 à 3	Vert	Jaune	Rouge	Grise	Grise	Grise
Poignet	de 1 à 4	Vert	Jaune	Orange	Rouge	Grise	Grise
Tronc	de 1 à 6	Vert	Vert	Jaune	Jaune	Rouge	Rouge

La méthodologie proposée permet de fournir aux concepteurs des **données quantitatives en temps réel** sur l'activité simulée durant les phases immersives. Les postures sont naturellement effectuées par l'opérateur en immersion. Cela permet une **analyse ergonomique dynamique et continue** des postures adoptées par le mannequin virtuel, là où les analyses traditionnelles sont effectuées de manière discrètes (statiques) (Jayaram et al. 2006). Une telle approche peut ainsi faciliter l'intégration des considérations ergonomiques dans les phases amont de la conception. Elle peut également permettre une meilleure appréciation des contraintes par les concepteurs, que ce soit lors des études préliminaires, ou lors des études détaillées.

L'application de cet outil au travers de la visualisation du score et de la coloration des membres en temps réel sera illustrée lors de cas d'études expérimentaux présentés au chapitre IV.

Cet outil permet d'analyser ergonomiquement l'activité de l'utilisateur sur des bases normatives. Le spectre d'étude est cependant centré sur des sujets "idéaux", ayant des caractéristiques biomécaniques "classiques". Nous pouvons déplorer un manque d'informations exploitables pour des personnes ayant des limites physiques particulières. Par exemple, la zone de confort de l'avant-bras est définie pour une flexion comprise entre 60° et 100°. Cependant, une ou plusieurs limitations articulaires engendrera une évaluation de zone différente. Une arthrose au niveau du coude, par exemple, induira douleurs et gênes dans les mouvements de l'avant-bras. La zone de confort ressentie par le sujet sera donc différente de celle définie pour un individu sain.

Nous proposons de définir désormais des indicateurs permettant de prendre en compte des données fonctionnelles spécifiques lors de la simulation de l'activité de l'utilisateur.

6.5.2 Capacités fonctionnelles spécifiques

6.5.2.1 Définition des configurations articulaires

De nombreuses déficiences ou combinaisons de déficiences peuvent avoir un impact direct sur l'interaction entre le sujet et son environnement. Dans nos travaux de recherche, les déficiences physiques spécifiques seront traduites et simulées par le biais de limitations articulaires. Nous avons fait le choix de nous concentrer dans un premier temps sur les membres supérieurs et certains mouvements associés : flexion du tronc, flexion de l'avant-bras (articulation du coude), extension de l'avant-bras (articulation du coude), et abduction du bras (articulation de l'épaule), représentés Figure 6-26.

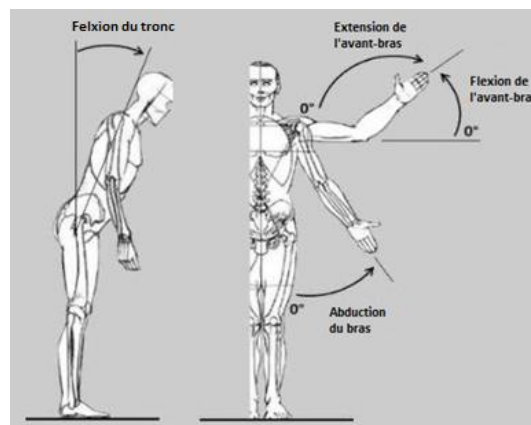


Figure 6-26. Représentation des configurations articulaires des membres supérieurs étudiées.

Comme précédemment, la flexion et l'extension de l'avant-bras, ainsi que la flexion du tronc sont définies à partir des configurations articulaires liées au coude et au bassin. L'abduction du bras (β_e) (articulation de l'épaule) est définie par l'angle entre l'axe longitudinal du bras (L_b) et l'axe longitudinal du tronc (L_t) autour de l'axe sagittal du tronc (S_t). Ainsi, le repère local reste fixe même pour une abduction de l'épaule supérieure à 90°.

Les **données fonctionnelles** liées au sujet sont **définies par l'équipe de conception**, en fonction des caractéristiques du ou des utilisateurs finaux.

6.5.2.2 Définition des indicateurs

Les concepteurs peuvent définir les capacités articulaires du mannequin. De même que pour les analyses ergonomiques présentées paragraphe 6.5.1, les données fonctionnelles sont analysées de manière continue. Dès qu'une configuration articulaire est plus importante que celle définie par l'équipe de conception, le membre concerné change de couleur, indiquant instantanément que **l'activité réalisée par le mannequin numérique ne respecte pas les capacités fonctionnelles de l'utilisateur.**

Pour tenter de quantifier ces données, nous avons mis en place une classification inspirée des travaux de Lämkuil et al. (2009) (lui-même inspiré de Petrén (1968)). Dans ces travaux, l'évaluation ergonomique d'une tâche d'assemblage est basée sur la comparaison des configurations articulaires du mannequin par rapport à des exigences ergonomiques prédéfinies. Une classification des valeurs est ainsi réalisée en utilisant un système multizone à trois niveaux : 1. vert (correct) -la tâche comporte des risques négligeables-, 2. jaune (acceptable) -la tâche implique un certain risque de trouble-, et rouge (inacceptable) - la tâche est clairement dangereuse et implique un grand risque de trouble.

Dans notre cas, ce principe de niveaux de couleurs est utilisé pour définir des niveaux d'exigences, basés sur les limitations fonctionnelles spécifiques du sujet. La classification des valeurs est définie par le système multizone suivant :

1. Aucune coloration – la limite articulaire prédéfinie n'est pas atteinte.
2. Coloration jaune du membre concerné – le mannequin dépasse la limite articulaire prédéfinie de moins de 15% de l'amplitude totale;
3. Coloration orange du membre concerné – le mannequin dépasse la limite articulaire prédéfinie entre 15% et 30% de l'amplitude totale;
4. Coloration rouge du membre concerné –la posture adaptée implique un dépassement de plus de 30% de l'amplitude totale admissible.

Ces valeurs ont été définies dans l'objectif d'être représentatives des changements des configurations articulaires; un intervalle de 15% étant jugé comme un écart significatif par rapport aux données souhaitées. Une fois renseignées, ces limitations sont visibles en temps réel par coloration du membre du mannequin (Tableau 6-3). *A noter qu'il a été délibérément choisi de baser le retour d'information sur des stimuli essentiellement visuel, le but étant de limiter la surcharge cognitive des canaux sensori-moteurs et ainsi limiter le nombre de modalités simultanées sur chacun des canaux* (Bouyer 2007).

Ces données sont complémentaires avec celles développées et intégrées précédemment. Dans le cas d'un membre atteint d'une déficience, celui-ci sera coloré à partir des données liées aux capacités spécifiques du sujet, et non à partir des données ergonomiques normées. Un même membre ne pourra donc pas être simultanément concerné par les deux approches. Ceci est cohérent car l'intégration d'une déficience engendre une modification des zones de confort, et l'évaluation normative n'est donc plus applicable. Cependant, celle-ci peut être appliquée aux autres membres non atteint par une déficience. L'application de cette combinaison de données (normées et spécifiques), sera présentée dans un cas d'application expérimental chapitre IV paragraphe 7.2.4.

Tableau 6-3. Définition de la coloration des segments en fonction de l'écart de la configuration articulaire mesurée par rapport à celle prédéfinie.

Dépassement de la limite articulaire définie	< limite définie	0% < <15%	15% < <30%	>30%
Coloration du membre concerné	Aucune	Jaune	Orange	Rouge

Cet outil permet d'intégrer les **capacités fonctionnelles spécifiques** du sujet lors de la simulation de l'activité. Les limitations articulaires sont visualisées en **temps réel** fournissant des **données quantitatives de manière dynamique et continue** sur les capacités de l'utilisateur. Un exemple de visualisation des données sur le mannequin est présenté Figure 6-27. Cette visualisation peut permettre un meilleur ressenti des contraintes par les concepteurs, que ce soit lors des études préliminaires, ou lors des études détaillées. L'utilisation de cet outil sera présentée et discutée plus en détail au chapitre IV.



Figure 6-27. Exemple de limites fonctionnelles visualisées "quantitativement" sur le mannequin virtuel.

Les outils présentés correspondent au besoin d'intégration de données fonctionnelles normées et spécifiques lors des phases immersives (étape 4 Figure 6-7). Ces caractéristiques sont en effet particulièrement mises en œuvre lors de l'interaction de l'utilisateur avec le prototype virtuel, et donc essentielles pour l'étude de l'usage du produit. L'objectif est désormais de pouvoir intégrer des déficiences physiques particulières (notamment visuelles), autres que ces données fonctionnelles (étape 5 Figure 6-7), mais pouvant avoir un impact non négligeable sur l'activité du mannequin dans l'EV.

6.5.3 Déficiences multi-sensorielles

Le dispositif permet de gérer les informations sensorielles perçues par l'opérateur en immersion. Cette caractéristique peut être utilisée pour le développement de multiples déficiences liées aux canaux visuels et sonores par exemple. La vision à la 1ère personne étant réalisée à l'aide d'un casque immersif, aucun stimulus visuel extérieur ne peut atteindre l'utilisateur immergé. Nous avons exploité cette spécificité pour simuler une déficience visuelle commune, à savoir la dégénérescence

maculaire liée à l'âge (DMLA). Cette déficience correspond à une dégradation d'une partie de la rétine (la macula), pouvant mener à la perte de la vision centrale. Cette maladie, est la première cause de handicap visuel chez les personnes de plus de 50 ans. Elle concerne environ 10 % des 65-75 ans et 25 à 30 % des plus de 75 ans.

Parmi les symptômes de la DMLA, nous pouvons citer la diminution de la sensibilité aux contrastes (images paraissant plus ternes ou jaunies), la diminution de l'acuité visuelle (difficultés à percevoir les détails), la déformation des lignes droites, ou encore l'apparition d'une tache sombre centrale (perception d'une tache noire ou grise devant l'œil).

L'exemple de simulation proposée ici est basé sur cette dernière spécificité. La Figure 6-28 montre la vision immersive obtenue avant et après simulation d'une tâche centrale semblable à celle pouvant être rencontrée par une personne atteinte de DMLA. Une diminution de l'acuité visuelle a également été simulée (Figure 6-28).

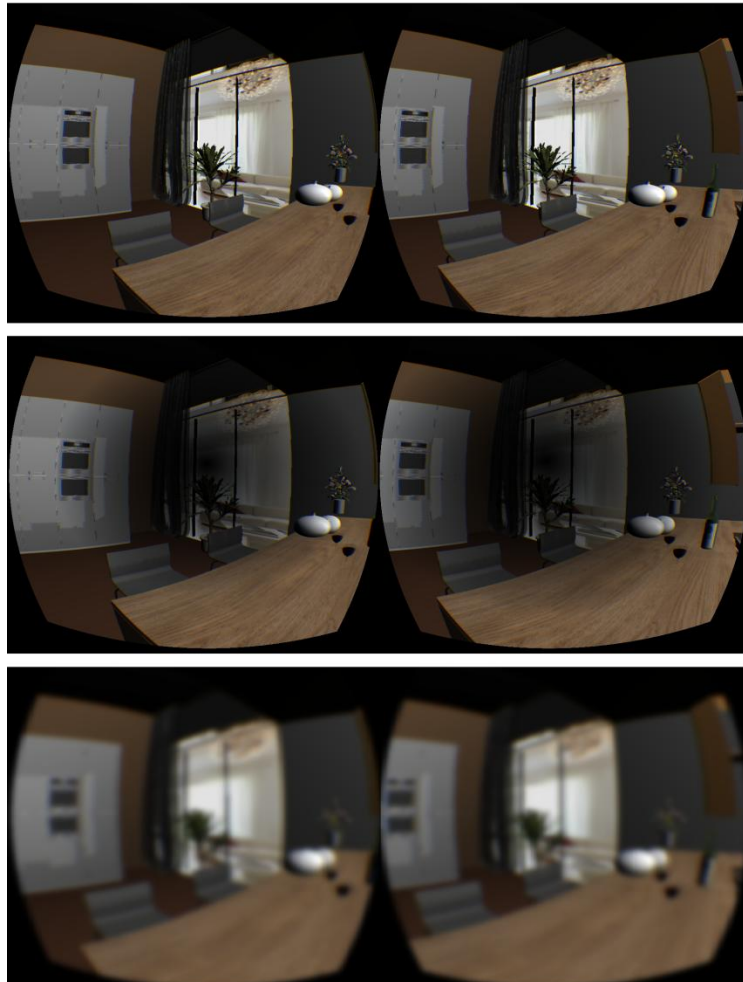


Figure 6-28. *Vision immersive sans déficience visuelle (haut), avec simulation de dégénérescence maculaire moyenne (DMLA) (centre), et avec simulation d'une diminution de l'acuité visuelle (bas).*

Ces simulations permettent à l'utilisateur immergé d'avoir un premier ressenti efficace du handicap que peut engendrer ce type de pathologie, et notamment sur l'interaction avec l'environnement. Ceci fournit un support aux concepteurs pour leur permettre d'étudier l'impact de telles déficiences sur la réception de l'information émise par le produit, ou l'environnement étudié. Ces troubles

peuvent en effet être une source de handicap pour le sujet, engendrant des difficultés dans les tâches de la vie de tous les jours (lecture de signalisation, identification de symboles, reconnaissance des visages, etc.). Dans cette optique, de nombreuses pathologies visuelles telles que la rétinopathie diabétique, le glaucome, la cataracte, ou le daltonisme, pourrait être également simulées.

A noter que dans le cas de cette étude, les simulations fournissent un premier aperçu, mais ne sont pas basées sur des données médicales strictes. D'autres développements pourraient permettre une simulation plus rigoureuse de ce type de limitations (Ates et al. 2015). La DMLA étant une maladie évolutive, il serait également envisageable de définir la simulation en fonction du niveau de développement de la maladie⁸.

6.6 Interface utilisateur

6.6.1 Intégration des caractéristiques du mannequin

Comme présenté Figure 6-7 (étape 3 et 4), les données anthropométriques et fonctionnelles du mannequin doivent être définies par les concepteurs pour simuler au mieux les caractéristiques de l'utilisateur final. De plus, la simulation doit être initialisée par rapport aux caractéristiques de l'opérateur en immersion pour une interaction robuste avec le mannequin virtuel.

Pour faciliter l'intégration de ces données, une interface graphique a été développée. Cette interface interactive permet, par l'intermédiaire de boutons et de champs d'entrée, de définir simplement les paramètres de la simulation. L'interface est lancée automatiquement à chaque début de simulation avec une possibilité de garder en mémoire les données de la session précédente. Les différentes fenêtres de l'interface et leurs fonctionnalités sont présentées en détail en Annexe F.

L'interface peut être affichée à tout moment durant les phases immersives, **facilitant l'intégration et le changement en temps réel des caractéristiques anthropométriques et fonctionnelles du sujet**. Ces changements sont ainsi effectués rapidement au cours de la simulation, autorisant une **analyse continue** du produit, sans rompre la phase immersive. De même que pour le paragraphe 6.4, l'utilisation de l'interface est visible au lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=wNvd310Bpdw>.

La Figure 6-29 représente une des fenêtres de l'interface développée. Celle-ci permet la création du mannequin (représentatif de l'utilisateur final), par la définition de ses données anthropométriques spécifiques, de sa corpulence, et de son sexe. Ceci correspond à un cas où les caractéristiques anthropométriques du sujet sont connues. Cependant, pour de nombreux projets de conception, les caractéristiques de l'utilisateur cible ne sont pas connues avec précision. Celui-ci est alors souvent défini pour être représentatif d'une partie de la population cible (mannequins bornes classiquement rencontrés dans les logiciels de modélisation par exemple) (Dainoff 2004). Dans cette optique, nous avons enrichi l'interface en permettant l'intégration de mannequin prédéfinis. Des mannequins représentatifs des caractéristiques anthropométriques du 5^{ième}, 50^{ième}, et 95^{ième} centile homme et femme (définis à partir de la base de données ANSUR), peuvent alors être automatiquement créés et insérés par simple sélection dans l'interface.

⁸ <http://www.inclusivedesigntoolkit.com/betterdesign2/simsoftware/simsoftware.html>

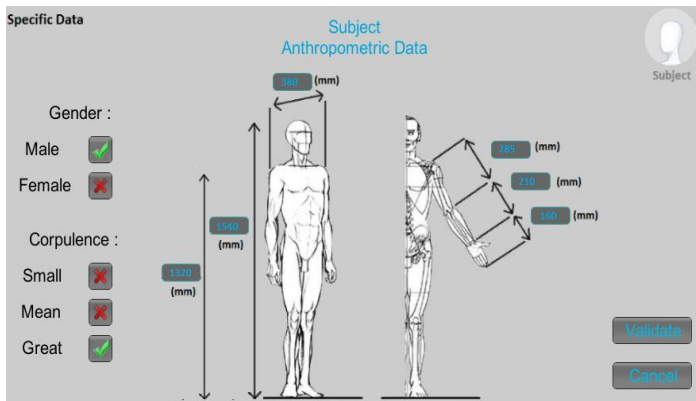


Figure 6-29. Interface permettant l'intégration des données anthropométriques de l'utilisateur simulé.

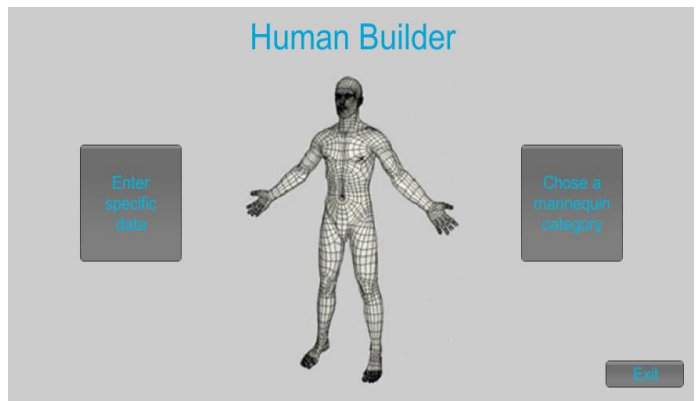


Figure 6-30. Initialisation de la construction du mannequin soit à partir de données spécifiques, soit à partir de données génériques (centiles base ANSUR).

La première fenêtre de l'interface Figure 6-30 offre donc l'opportunité de choisir entre la construction d'un mannequin à partir de caractéristiques spécifiques, ou à partir de données prédéfinies. Ceci permet de **guider la construction de la simulation en fonction du problème étudié et du niveau de connaissance sur l'utilisateur**. Elle joue donc également un rôle d'assistance à la conception.

6.6.2 Assistance à la conception

L'interface permet de définir rapidement les données de la simulation en fonction du problème étudié. La Figure 6-31 représente la structure de l'interface, et les différentes données supportant la construction de la simulation immersive.

L'initialisation est l'étape commune durant laquelle les données anthropométriques de l'opérateur sont indiquées, permettant de configurer correctement la simulation. La seconde étape correspond à la définition des caractéristiques anthropométriques du sujet (spécifiques ou prédéfinies). La modélisation des caractéristiques fonctionnelles du sujet peut ensuite être effectuée soit à partir de données liées aux limites de confort (comme présenté paragraphe 6.5.1), soit à partir de limites physiologiques (amplitudes maximales admissibles comme dans le paragraphe 6.5.2 par exemple). Ce choix tient à l'équipe de conception, en fonction du type de problème étudié, et des caractéristiques des utilisateurs cibles (voir exemples en Annexe G).

Dans les deux cas de figures, ces limites peuvent être connues (branches 1 Figure 6-31) ou dépendre de normes préétablies (branches 2 Figure 6-31). Les configurations présentées précédemment correspondent aux branches A.α.2 et A.β.1, ou bien B.α.2 et B.β.1 de la Figure 6-31.

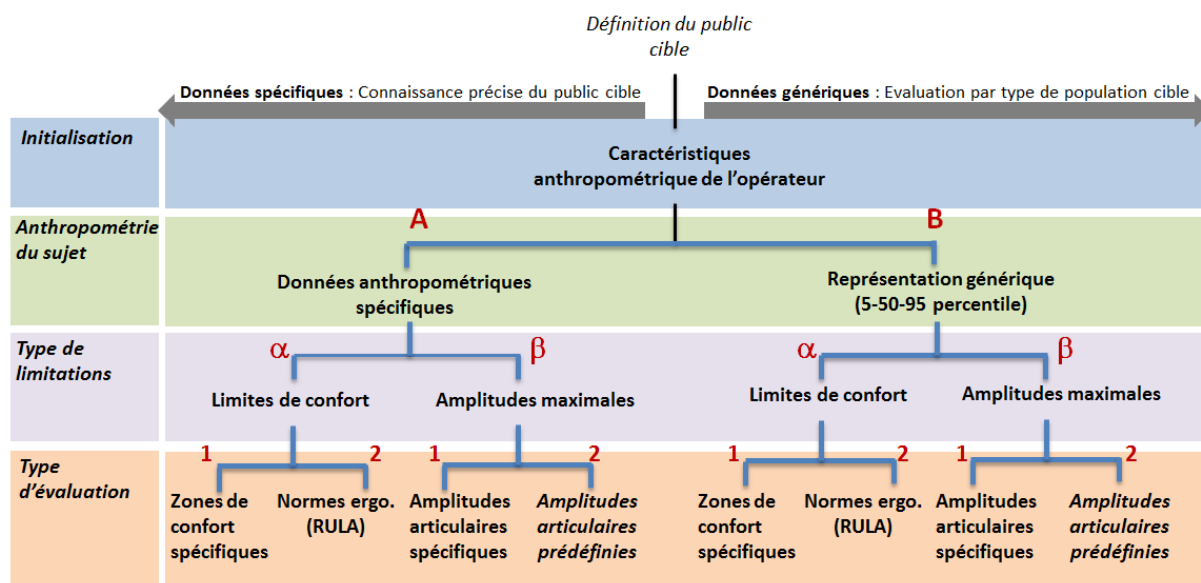


Figure 6-31. Représentation des différentes données pouvant être intégrées dans l'interface utilisateur, et des types d'évaluations associés.

Les autres configurations correspondent à des situations d'études plus particulières. Les configurations A.α.1 et B.α.1 induisent de connaître les données de confort spécifiques à l'utilisateur cible, ce qui en pratique est rarement disponible. Les configurations A.β.2 et B.β.2 correspondent à un cas où les amplitudes articulaires maximales de l'utilisateur ne sont pas connues, et doivent répondre de données normées ou prédéfinies. Or, contrairement aux données de confort, il est très difficile de définir des limitations articulaires « types ». Ceci sous-entendrait de pouvoir modéliser les déficiences des utilisateurs par des catégories de limitations précises, ce qui n'est pas possible au vu du large spectre de capacités physiques existantes. Ceci représente d'ailleurs un enjeu particulier dans le cas où le produit doit répondre aux exigences d'un grand nombre de personnes présentant des déficiences physiques, comme dans une optique de conception « pour tous ».

Tableau 6-4. Amplitudes articulaire maximale en fonction du niveau de déficience (ICIDH).

Amplitude articulaire	Pas de déficience	Déficience légère	Déficience moyenne	Déficience sévère	Déficience complète
Abduction de l'épaule	0-180°	0-171°	0-135°	0-90°	0-7°
Extension / Flexion du coude	0-145°	0-138°	0-109°	0-73°	0-6°
Flexion du tronc	0-90°	0-85°	0-67°	0-45°	0-4°
Pourcentage associé	0-4 %	5-24%	25-49%	50-95%	96-100%

Une approche pourrait consister à définir ces limitations à partir des niveaux de déficiences (Bouvier, 2009). Le ICIDH (World Health Organisation 2001) par exemple définit les limites articulaires des mouvements du corps par des niveaux allant de faible à sévère. Le Tableau 6-4 présente les limites associées aux mouvements des membres de la chaîne supérieure (abduction de l'épaule, flexion du

tronc, extension et flexion du coude), en fonction du niveau de déficience. Une telle approche pourrait ainsi permettre d'évaluer le concept virtuel à partir de mannequins numériques ayant des limitations fonctionnelles « représentatives » d'un certain niveau de déficience. *Nous reviendrons plus précisément sur ces différents points dans le chapitre IV.*

6.7 Conclusion

Les travaux présentés permettent de soutenir les acteurs de la conception dans une approche centrée-utilisateur et universelle. Premièrement, le dispositif mis en place permet l'**intégration des capacités physiques particulières des personnes présentant des déficiences dans les simulations immersives**. Le mannequin virtuel paramétrable permet de représenter à la fois les caractéristiques anthropométriques (non cantonnées au spectre classique des 95 centiles), et certaines données physiques de l'utilisateur. Ensuite, les concepteurs peuvent **interagir en temps réel "dans la peau" du mannequin**. L'implication physique induite par le dispositif permet d'interagir de manière naturelle avec l'EV **pour expérimenter et analyser l'activité de l'utilisateur**. Ils peuvent « vivre » eux-mêmes l'usage au travers d'une **interaction et d'un point de vue représentatifs** du sujet simulé.

Les outils d'analyses permettent aux experts en facteurs humains de disposer de données à la fois qualitatives et quantitatives liées au couple produit/usage. Des analyses ergonomiques peuvent être effectuées à partir de normes biomécaniques prédéfinies, et à partir de capacités fonctionnelles spécifiques. Ces données sont simulées et visualisées en temps réel par les membres de la conception. Ainsi, **les caractéristiques spécifiques de l'utilisateur (mannequin numérique) sont prises en compte lors de la simulation virtuelle de l'activité**. Une interface a été créée permettant de **soutenir l'intégration et la modification en temps réel des caractéristiques spécifiques du sujet**. Ainsi, les évaluations peuvent être effectuées de façon dynamique et continue, sans rompre les phases immersives.

Le moteur de rendu 3D temps réel fournit un environnement de travail visuellement et physiquement très réaliste, permettant une simulation immersion proche d'un véritable espace physique. Le concepteur peut interagir naturellement avec l'EV au travers des gestions de collisions et du moteur physique intégrés. Le couplage de cet environnement et des interfaces comportementales constitue un **dispositif de simulation "ouvert" et extensible**, permettant de développer de nouvelles fonctionnalités (types de déficiences par exemple) en fonction du problème étudié.

Le dispositif permet donc d'intégrer des données objectives et subjectives liées à l'utilisateur, lors des phases d'évaluation immersive. Il est désormais nécessaire d'étudier dans quelle mesure celui-ci peut aider les acteurs de la conception à **mieux anticiper et évaluer les impacts des capacités physiques spécifiques sur l'usage du produit**. Le chapitre suivant présente ainsi l'utilisation du dispositif au travers de cas d'applications expérimentaux (Figure 6-32). D'un point de vue général, nous proposons d'étudier comment celui-ci peut contribuer à optimiser le processus d'évaluation et de conception de produits, et notamment pour les personnes présentant des besoins spécifiques (personne en situation de handicap, personne âgée, etc.). Nous pensons que cela passe notamment par une mutualisation des compétences des différents experts métiers, aux travers d'une évaluation collaborative du futur produit, avec comme entité centrale le dispositif de réalité virtuelle. Celui-ci

représente alors un **système intermédiaire de conception**, et est utilisé comme médiateur de conception et support pour la représentation du concept. Nous présenterons également l'apport du dispositif, en tant qu'outils de prototypage temps réel, pour optimiser l'exploration du couple produit/usage.

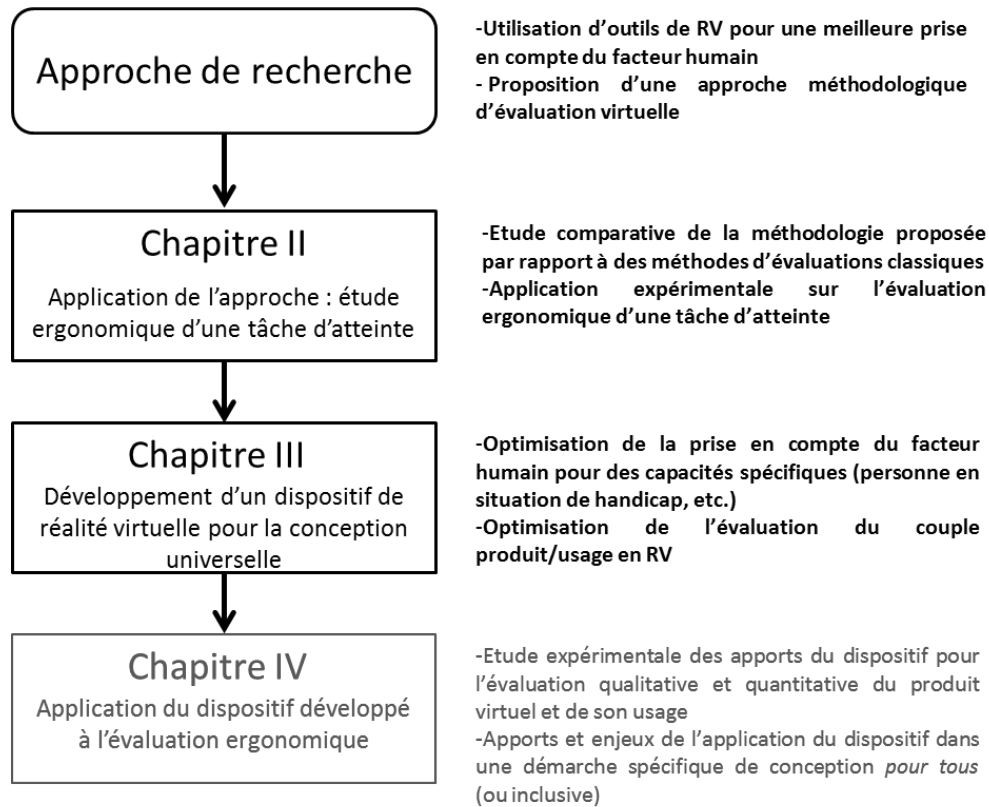


Figure 6-32. Représentation des différents chapitres et points précédemment développés.

Chapitre IV

Application du dispositif développé

7 Application à l'évaluation ergonomique

7.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter l'application du dispositif développé précédemment dans un contexte expérimental, et d'en étudier les apports, notamment lors des phases d'évaluation immersive du concept virtuel. Nous proposons également le développement d'outils et fonctionnalités permettant d'enrichir le dispositif pour soutenir les concepteurs dans l'évaluation du couple produit/usage, et en particulier dans le cas de personnes en situation de handicap.

Ainsi, le paragraphe 7.2 présente une étude qualitative et quantitative d'un produit virtuel en usage. Cette partie soulignera notamment les apports des outils d'analyse temps réel dans la prise en compte du handicap et de son impact sur le comportement de l'utilisateur.

Le paragraphe 7.3 propose le développement d'outils complémentaires pour optimiser l'évaluation immersive, de manière qualitative et quantitative. Ceci passera par la modification interactive du prototype virtuel ou des propositions d'indicateurs, offrant un meilleur ressenti des contraintes physiques du mannequin par les membres de l'équipe de conception.

Dans le paragraphe 7.4, nous présentons les outils développés pour permettre une meilleure analyse et anticipation de l'impact de déficiences sur l'activité de l'utilisateur en usage du produit.

L'utilisation du dispositif dans un contexte de conception et d'évaluation de produit a été qualitativement évaluée par un panel d'utilisateurs. Le paragraphe 7.5 présente et discute des résultats obtenus. Nous proposons dans la partie 7.6 un exemple d'application dans un cas d'étude en environnement plus contraint. Enfin, le paragraphe 7.7 conclut sur les apports du dispositif dans la conception et l'évaluation en RV de l'usage, notamment pour les personnes présentant des déficiences physiques.

7.2 Expérimentation 1 : étude qualitative et quantitative de l'usage en RV

7.2.1 Présentation

L'objectif de cette partie est d'étudier l'apport du dispositif développé précédemment, au-travers d'une application pratique, dans un cas d'étude expérimentale. Nous nous plaçons dans un contexte de phase d'évaluation immersive en RV. Les simulations menées dans l'EV ont pour but de permettre aux concepteurs d'étudier et d'analyser le prototype virtuel et son usage. Celui-ci peut aussi bien représenter des préconcepts que des concepts plus détaillés.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi un prototype virtuel représentatif d'un environnement communément rencontré et connu de tous, à savoir une cuisine équipée (Figure 7-1). Un modèle numérique, défini à partir d'un logiciel de modélisation 3D (Google SketchUp 7.0), est

intégré dans l'environnement de Unity3D. Il est représenté à partir d'un certain nombre de caractéristiques, définissant les dimensions des éléments, leurs assemblages ou encore leurs textures. L'environnement a été modélisé à partir des dimensions standards d'une cuisine.

Le but de ce prototype virtuel est de représenter un système générique, pouvant être identifié à des aménagements intérieurs, ou bien des postes de travail en industrie. Les caractéristiques dimensionnelles entre l'utilisateur et ce produit, ainsi que les tâches associées, sont ainsi représentatives de nombreuses situations d'étude. L'intérêt d'un tel environnement est de pouvoir répondre aux exigences de nombreux utilisateurs, ayant souvent des caractéristiques très différentes (enfants, adultes, personnes en situation de handicap, personnes âgées, etc.) (Afacan & Demirkan 2010).



Figure 7-1. Environnement (prototype) virtuel étudié lors des phases immersives en RV.

7.2.2 Analyse qualitative de l'usage

7.2.2.1 Evaluation collaborative du couple produit/usage

Nous proposons premièrement d'appliquer notre dispositif au-travers d'une phase d'évaluation immersive impliquant quatre acteurs, représentant différents membres d'une équipe de conception (concepteurs et experts métier). Leurs rôles seront détaillés dans la suite du document. Nous nous intéressons particulièrement ici à la relation entre l'utilisateur et le système virtuel (cuisine représentée Figure 7-1). L'utilisateur est modélisé à l'aide du mannequin virtuel présenté chapitre III. L'objectif est d'étudier et d'analyser qualitativement l'activité de celui-ci, en interaction avec l'EV.



Figure 7-2. Quatre points d'intérêt (1, 2, 3 et 4) représentés dans l'environnement virtuel, définissant les tâches d'atteintes de l'utilisateur.

Nous avons défini l'activité de l'utilisateur comme différentes tâches d'atteinte à réaliser. Pour cela, des points d'intérêt ont été ajoutés au prototype initial, comme nous le montre la Figure 7-2 (points 1, 2, 3, 4). L'atteinte de ces différents points clés par l'utilisateur modélise ainsi des tâches génériques, rencontrées dans de nombreux problèmes de conception. Dans ce cas d'étude, nous nous concentrerons sur les éléments de la cuisine, correspondant au couple « plan de travail-placard ».

Nous proposons d'appliquer le dispositif pour étudier l'activité de 3 utilisateurs, ayant des caractéristiques dimensionnelles différentes. Ceux-ci ont été choisis pour être représentatif du 5^{ème} centile femme, 50^{ème} et 95^{ème} centiles homme (définis à partir de la base ANSUR). Ils modélisent ainsi un large spectre de la population (en termes d'anthropométrie).

Configuration du dispositif de RV

Dans le chapitre III ont été présentés les différents éléments permettant la création du dispositif immersif. L'accent est mis sur le concepteur en immersion, interagissant avec l'EV. Cependant, dans le cadre des phases d'évaluation du concept virtuel en RV, ce dispositif est plus global, et s'intègre dans une configuration faisant intervenir les différents membres de la conception. La Figure 7-3 est une représentation schématique de la configuration du dispositif d'évaluation. *Nous détaillerons les différents points par la description des évaluations réalisées. A noter que les images présentées ci-après font parties de vidéo (films et screencast) enregistrées durant les simulations immersives, permettant d'illustrer au mieux les données observées.*

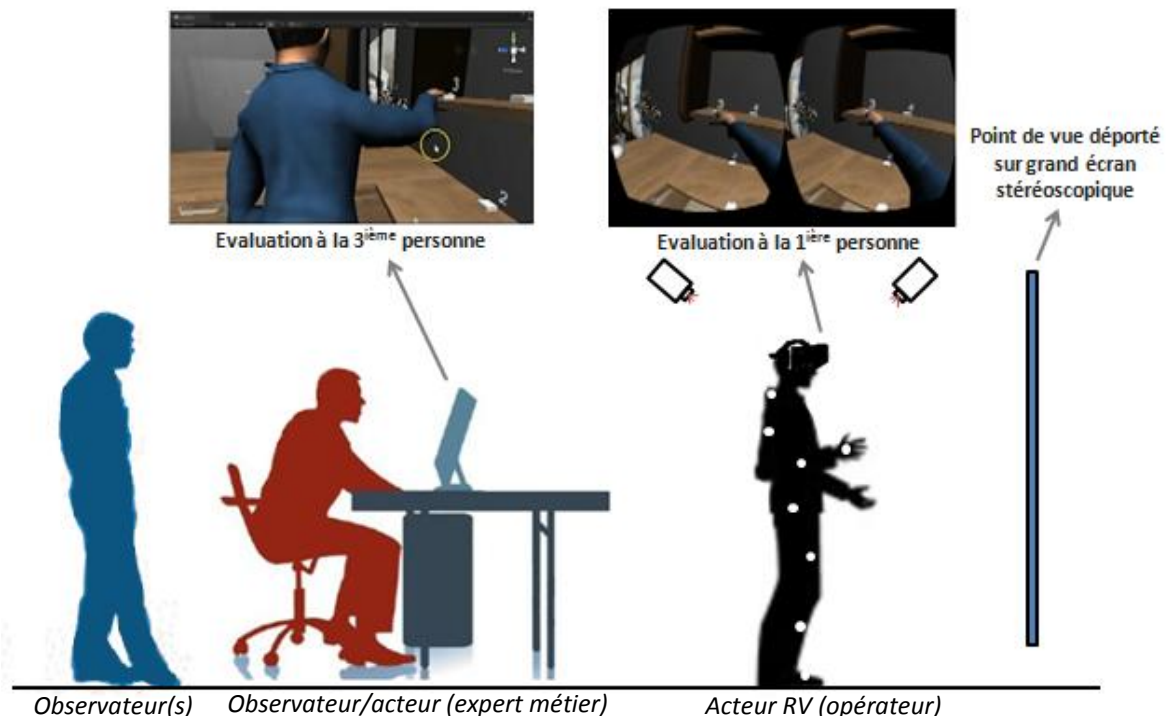


Figure 7-3. Configuration globale du dispositif d'évaluation, présentant les différentes positions et les points de vue fournis.

7.2.2.2 Phase d'évaluation en RV

Premièrement, l'opérateur (en noir Figure 7-3) est équipé des interfaces comportementales définies par le dispositif (capture de mouvement et casque immersif). L'expert métier sur l'ordinateur (en rouge Figure 7-3), par le biais de l'interface présentée chapitre III, configure l'évaluation et indique les données anthropométriques de l'utilisateur cible à simuler. Une fois les différentes données renseignées (données anthropométriques, fonctionnelles, déficiences, etc.), l'expert métier valide les informations, et le mannequin est automatiquement créé dans la scène virtuelle.

Comme présenté dans les chapitres précédents, la phase d'étude immersive, permettant l'évaluation du couple produit/usage, est définie par le système « **Homme-réel-virtuel, Produit-virtuel, Environnement-virtuel** ». Ainsi, l'opérateur immergé (Homme réel), a un **rôle d'acteur RV**. Il interagit directement dans la peau du mannequin défini, et simule l'activité de l'utilisateur en réalisant les tâches d'atteintes pour chacun des mannequins. Il a un fort niveau d'interaction et d'immersion, lui permettant d'explorer naturellement l'EV et d'exprimer au mieux ses impressions sur l'activité simulée du sujet. Il peut ainsi physiquement ressentir les contraintes liées aux postures réalisées dans l'EV. Les autres membres de la conception (en bleu Figure 7-3) observent les postures et gestes adoptés, pour chacun des points à atteindre ; ils ont principalement un **rôle d'observateur**. Un écran stéréoscopique à l'échelle 1 leurs permet d'observer la simulation en cours, de deux points de vue différents. Premièrement, l'observation est réalisée d'un point de vue utilisateur, c.à.d. que les images projetées sur l'écran stéréoscopique correspondent à celles observées par l'opérateur portant le casque immersif (Figure 7-4). Deuxièmement, l'observation est effectuée d'un point de vue extérieur en observant l'opérateur. Cette démarche permet une meilleure identification des facteurs physiques et comportementaux liés au sujet simulé. Ils peuvent efficacement apprécier ce que l'utilisateur, avec ses caractéristiques anthropométriques propres, peut voir ou non, atteindre ou non, sans être directement immergé. Dans le cas de la simulation d'une déficience visuelle (DMLA) par exemple, ils peuvent **se rendre compte des contraintes visuelles engendrées, et des conséquences sur l'usage du produit**. L'opérateur, quant à lui, complète ces informations avec son ressenti physique et sensoriel de l'expérimentation.



Figure 7-4. Opérateur immergé réalisant une évaluation d'atteinte dans l'EV, et écran stéréoscopique qui retranscrit la vision de l'utilisateur aux autres membres de l'équipe de conception.

L'écran stéréoscopique permet également d'observer la simulation en cours d'un point de vue à la troisième personne. Le dispositif permet ainsi d'examiner simultanément l'activité du mannequin d'un point de vue immersif et "extérieur". Les concepteurs peuvent apprécier le comportement global de l'utilisateur, et son interaction avec le prototype. Sur la Figure 7-5 par exemple, on peut observer la posture adoptée par le mannequin virtuel représentatif du 5^{ème} centile femme, atteignant le point 3 de l'EV. Le mannequin se positionne sur la pointe des pieds pour pouvoir réaliser la tâche. L'interaction naturelle de l'opérateur couplée à une observation de l'activité par les concepteurs, permet de mettre en évidence ce type de comportements spécifiques, difficiles à déterminer avec d'autres méthodes classiques d'analyses.

L'expert métier sur l'ordinateur a quant à lui un rôle d'**observateur acteur**. Il peut agir sur l'environnement virtuel et définir à tous moments les paramètres de la simulation. Ainsi, il analyse plus précisément certains détails de l'activité simulée, et peut mettre en avant des informations que l'opérateur immergé n'aurait pu observer seul (collision d'un membre caché, position de son corps par rapport aux éléments de l'environnement, etc.).



Figure 7-5. Comportements observés lors de l'évaluation immersive de l'activité du mannequin représentatif du 5^{ème} centile femme. A gauche : le mannequin réalisant la tâche 1. A droite : celui-ci se met sur la pointe des pieds pour atteindre un point situé au-dessus de sa tête (tâche 3).

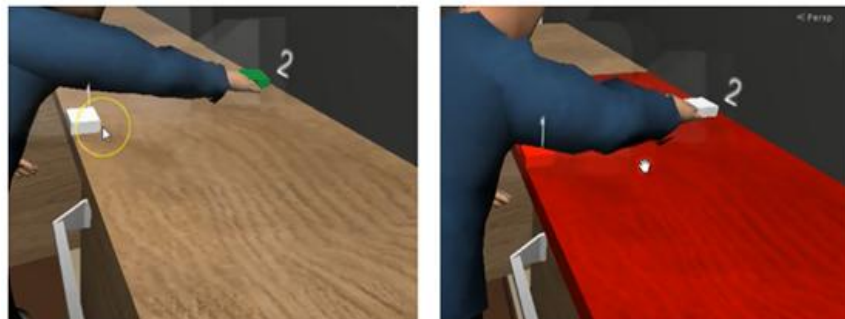


Figure 7-6. Visualisation de la tâche 2 par l'opérateur acteur. A gauche : mannequin 5^{ème} centile femme corpulence moyenne. A droite : mannequin 5^{ème} centile femme corpulence forte. Ici, le changement de corpulence ne permet plus au mannequin d'atteindre le point 2 (coloration blanche du point).

Des indicateurs visuels aident également à représenter les collisions entre le mannequin et le prototype, sans avoir recours à des solutions haptiques. La Figure 7-6 par exemple montre la coloration en rouge du plan de travail, lors de la collision avec le bras (due à la simulation d'un changement de corpulence du mannequin). Pour enrichir cette information au niveau des points d'intérêt, un code couleur a également été mise en place. Ainsi, une coloration rouge du point indique que celui-ci est atteint par le mannequin, mais qu'un autre membre est en collision avec le prototype. Au-contre, une coloration verte indique à l'opérateur que le point est correctement atteint, sans autres collisions avec l'EV (Figure 7-6).

7.2.2.3 *Prise en compte des capacités physiques spécifiques*

La visualisation des déficiences fonctionnelles par coloration des membres (partie 6.5 chapitre IV) fournit aux concepteurs des informations en temps réel sur les capacités physiques du sujet simulé. Les membres de la conception peuvent ainsi observer si les gestes et postures réalisés par le mannequin respectent ou non les données de l'utilisateur. L'opérateur en immersion peut quant à lui mieux se rendre compte des contraintes liées au handicap du sujet. Il peut ainsi savoir dans quelle mesure la déficience engendrera une limitation de l'activité chez le sujet.

7.2.3 Synthèse sur l'évaluation qualitative

Le dispositif développé constitue donc un **système de conception collaboratif, soutenant les concepteurs dans l'évaluation du prototype et de son usage**, et ce dès les études préliminaires. Il permet de **mutualiser les compétences des différents experts métiers** autour d'une représentation commune, facilement compréhensible, et très réaliste du prototype virtuel. Ils peuvent ainsi **simuler et observer de différents points de vue, l'activité de l'utilisateur** final, et émettre des recommandations subjectives sur le produit. L'implication physique de l'opérateur permet de mieux apprécier l'impact des choix de conception sur l'activité de l'utilisateur. La complémentarité du point de vue d'acteur immersif "vivant l'usage" et d'observateurs extérieurs permet d'aider à la **verbalisation des contraintes et des potentiels problèmes de conception**.

Pour une évaluation objective du prototype, il est également nécessaire de compléter l'analyse qualitative avec des outils d'évaluation ergonomique quantitatifs.

7.2.4 Analyse quantitative de l'usage

7.2.4.1 *Evaluation normative*

Comme présenté dans le chapitre III, le dispositif fournit des indications ergonomiques normées sur les postures réalisées par le mannequin virtuel. Nous proposons donc maintenant d'appliquer cet outil pour l'évaluation quantitative du couple produit/usage.

Nous nous plaçons dans les mêmes conditions expérimentales que précédemment. Les membres de la conception étudient quantitativement l'activité de l'utilisateur, représentatif tour à tour du 5^{ième}, 50^{ième}, et 95^{ième} centile. Pour chacun des mannequins, l'activité de travail définie au-travers des tâches d'atteintes des points d'intérêts, est analysée. Les postures adoptées sont évaluées par

visualisation des colorations sur les membres du mannequin. Le score postural total de la posture adoptée est également visible en temps réel par les concepteurs (Figure 7-7). Nous nous concentrons ici sur les zones de confort liées au tronc, à l'avant-bras, et au bras. Les Tableau 7-1, Tableau 7-2 et Tableau 7-3 résument les résultats obtenus, indiquant pour chaque mannequin si la tâche est réalisée (point atteint ou non), ainsi que la coloration des membres et le score associé. Pour rappel, une coloration verte représente une posture du membre acceptable, une jaune une configuration présentant des risques de troubles, et une rouge une configuration présentant des risques de troubles importants.



Figure 7-7. Visualisation du score postural et des zones d'inconfort sur les membres du mannequin virtuel.

Les résultats présentés soulignent la relation entre les caractéristiques anthropométriques du sujet, et les données ergonomiques obtenues. Les résultats sont donc logiquement différents pour les trois utilisateurs simulés.

Le mannequin 50^{ième} centile est celui pour qui l'EV est le mieux adapté, avec des scores posturaux plus faibles que pour les autres utilisateurs. Les principales zones d'inconfort sont situées au niveau du bras pour les points 3 et 4, représentant une élévation du bras pour atteindre les placards situés au-dessus de la tête. La tâche 2 engendre également une zone d'inconfort, due à une flexion du tronc chez le sujet, pour atteindre le point situé au fond du plan de travail.

Concernant le mannequin 5^{ième} centile, les postures adoptées posent plus de problèmes, notamment au niveau des points hauts du prototype (points 3 et 4). Ces caractéristiques anthropométriques ne lui permettent pas d'atteindre le point 4, et avec de grandes difficultés le point 3. Pour ce dernier, la posture engendre une élévation importante de l'épaule et du bras. Le mannequin est également obligé de se mettre sur la pointe des pieds pour atteindre le point voulu (Figure 7-5).

Pour le mannequin représentatif du 95^{ième} centile, les activités les plus critiques correspondent aux points d'atteintes les plus bas. La stature plus importante engendre ici une flexion plus grande du tronc pour atteindre ces points.

Le dispositif permet aux concepteurs de rapidement évaluer, et de manière quantifiée, le risque d'apparition de troubles liés aux postures adoptées par l'utilisateur. Ils peuvent ainsi avoir des **données objectives**, directement à partir de l'environnement de RV, pour améliorer l'ergonomie du

prototype. Ces données sont disponibles de manière **dynamique et continue**, permettant d'optimiser la phase d'évaluation qualitative et quantitative de l'usage (notamment dans les phases amont du processus où un nombre important de concepts peuvent être analysés). Ceci peut être un support important dans le domaine industriel par exemple, pour permettre la conception de postes de travail correctement adaptés, limitant les troubles chez l'opérateur. Les concepteurs ont directement en leur possession les résultats de l'analyse et peuvent **juger rapidement l'activité de l'utilisateur, en fonction de ses caractéristiques anthropométriques**.

Tableau 7-1. Résultats (scores) des évaluations posturales pour le mannequin 50^{ième} centile homme.

Zones de confort	Atteinte	Bras	Tronc
Point 1	Oui	1	1
Point 2	Oui	2	3
Point 3	Oui	3	1
Point 4	Oui	4	1

Tableau 7-2. Résultats (scores) des évaluations posturales pour le mannequin 5ième centile femme.

Zones de confort	Atteinte	Bras	Tronc
Point 1	Oui	2	1
Point 2	Oui	3	3
Point 3	Oui	5	1
Point 4	Non	--	--

Tableau 7-3. Résultats (scores) des évaluations posturales pour le mannequin 95^{ième} centile homme.

Zones de confort	Atteinte	Bras	Tronc
Point 1	Oui	1	3
Point 2	Oui	2	3
Point 3	Oui	3	1
Point 4	Oui	3	3

Cette approche démontre l'intérêt de proposer des évaluations ergonomiques objectives mettant en jeu les outils de réalité virtuelle, permettant aux concepteurs de prendre des décisions quantifiées sur l'ergonomie du futur produit. Cependant, ces analyses, comme la majorité des cas recensés dans la littérature, sont basées sur des sujets « idéals ». Autrement dit, **l'activité évaluée est celle d'une personne ne présentant aucune déficience physique**. Or, dans le cas d'un utilisateur présentant des limitations fonctionnelles spécifiques, ces évaluations peuvent ne plus être consistantes.

7.2.4.2 Prise en compte de capacités physiques spécifiques

Nous nous plaçons dans la situation précédente, avec des sujets présentant une déficience physique, impliquant une limitation d'extension de l'avant-bras. On choisit une limitation articulaire modérée (World Health Organisation 2001) représentative d'une réduction de 49% de la capacité d'extension (biomécaniquement admissible par le corps humain) au niveau du coude (paragraphe 6.6.2).

Comme présenté paragraphe 6.5.2, des niveaux de couleurs permettent aux concepteurs de visualiser en temps réel si les capacités physiques (articulaires) de l'utilisateur sont bien respectées. L'opérateur en immersion doit désormais **réaliser les tâches d'atteintes en respectant les capacités physiques des utilisateurs**. *A noter qu'ici, l'avant-bras étant défini par une capacité fonctionnelle particulière, l'analyse ergonomique normée ne peut plus lui être appliquée.*

Tableau 7-4. Résultats (scores) des évaluations posturales pour le mannequin 50^{ième} centile homme avec limitation.

Zones de confort	Atteinte	Bras	Tronc
Point 1	Oui	1	3
Point 2	Oui	3	4
Point 3	Oui	3	1
Point 4	Oui	4	3

Tableau 7-5. Résultats (scores) des évaluations posturales pour le mannequin 5^{ième} centile femme avec limitation.

Zones de confort	Atteinte	Bras	Tronc
Point 1	Oui	2	1
Point 2	Oui	3	3
Point 3	Non	--	--
Point 4	Non	--	--

Tableau 7-6. Résultats (scores) des évaluations posturales pour le mannequin 95^{ième} centile homme avec limitation.

Zones de confort	Atteinte	Bras	Tronc
Point 1	Oui	1	4
Point 2	Oui	2	4
Point 3	Oui	3	1
Point 4	Oui	3	3

Les Tableau 7-4, Tableau 7-5 et Tableau 7-6 résument les résultats obtenus, indiquant pour chaque mannequin si la tâche est réalisée (point atteint ou non), ainsi que la coloration des membres et le score associé. Les cases surlignées en bleu représentent une augmentation du score obtenu par rapport à la configuration précédente (mannequin sans limitation).

Les résultats montrent l'influence de l'intégration de la déficience sur l'analyse ergonomique de l'activité de l'utilisateur. Pour respecter les capacités physiques du sujet simulé, l'opérateur doit modifier sa posture d'atteinte, influant sur les positions des autres membres du corps.

Pour le mannequin 50^{ième} centile, le changement de posture induit une augmentation des zones d'inconfort, notamment au niveau du tronc. La Figure 7-8 par exemple représente les postures adoptées pour l'atteinte du point 1. Premièrement, le mannequin interagit avec l'environnement sans limitations physiques particulières (Figure 7-8a). Ensuite, la limitation de l'avant-bras est intégrée, la couleur jaune indiquant une flexion supérieure à la capacité admissible (Figure 7-8b).

Finalement, le mannequin virtuel (opérateur) adapte sa posture pour respecter les capacités physiques du sujet simulé (Figure 7-8c). Celle-ci induit une augmentation de la flexion du tronc, et l'apparition de nouvelles zones d'inconfort (Tableau 7-4). De même pour l'atteinte du point 4 (Figure 7-9) où la limitation engendre une élévation de l'épaule et une augmentation de la hauteur d'atteinte (mannequin sur la pointe des pieds).

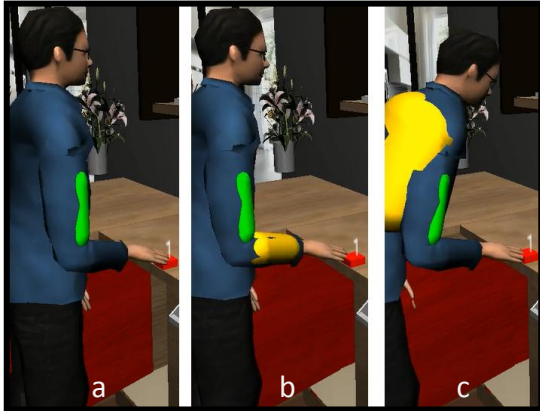


Figure 7-8. Atteinte du point 1 par le mannequin 50^{ième} centile. a) sans limitations physiques; b) intégration de la limitation de l'avant-bras; c) adaptation de la posture pour respecter les capacités physiques

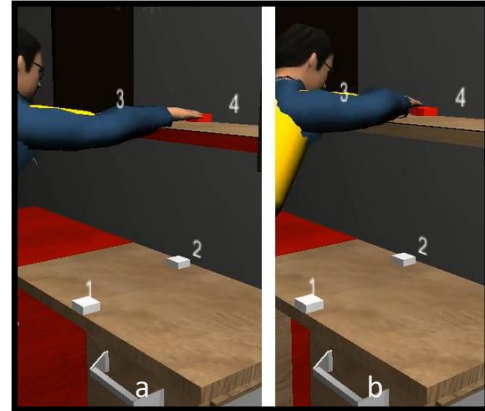


Figure 7-9. Atteinte du point 4 par le mannequin 50^{ième} centile. a) atteinte sans limitation ; b) l'intégration de la limitation engendre une élévation de l'épaule et de la stature (mannequin sur la pointe des pieds).

Pour le 95^{ième} percentile, la limitation engendre également une flexion plus importante du tronc pour l'atteinte des points bas du prototype. Par contre, celle-ci engendre une limitation d'activité pour le mannequin 5^{ième} centile, avec un point 3 devenu inaccessible en respectant les capacités physiques du sujet.

7.2.5 Discussion

Le dispositif fournit un **système d'évaluation collaborative** permettant aux concepteurs d'**analyser qualitativement et quantitativement le couple produit/usage**, en prenant à la fois en compte les données ergonomiques normées et les capacités physiques spécifiques de l'utilisateur. Ceci permet à l'équipe de conception **de simuler et d'anticiper l'activité future souhaitable du sujet, en fonction de ses déficiences physiques**. L'interaction immersive de l'opérateur avec l'EV permet une prise en compte et une adaptation naturelle des postures adoptées par les utilisateurs présentant des déficiences fonctionnelles. Le dispositif soutient la simulation et la **prise en compte des stratégies de compensation spécifiques mises en œuvre par l'utilisateur en situation de handicap**, et leurs impacts sur le confort et l'activité du sujet. Les concepteurs peuvent donc **construire et avoir accès à l'usage futur du produit, en fonction des caractéristiques anthropométriques et des capacités physiques spécifiques de l'utilisateur**. Ces données servent de critères pour déterminer les modifications éventuelles à effectuer pour améliorer l'ergonomie du produit.

Pour réaliser ces modifications, les concepteurs doivent cependant rompre la phase d'évaluation immersive, appliquer les changements voulus sur le modèle natif, et relancer la simulation. Il serait donc intéressant de pouvoir fournir aux concepteurs des outils complémentaires, permettant de

réaliser les modifications *in situ*. La section suivante propose ainsi d'optimiser l'évaluation du couple produit/usage en RV, en développant les capacités de prototypage temps réel durant les évaluations virtuelles. Nous proposerons également une optique d'optimisation de la simulation du ressenti des contraintes physiques de l'utilisateur simulé.

7.3 Optimisation de l'évaluation du couple produit/usage en RV

7.3.1 Ressenti physique des déficiences

La visualisation des limitations ne permet pas à l'opérateur immergé de pleinement ressentir les contraintes liées à la déficience fonctionnelle simulée. Une solution pourrait être d'utiliser des interfaces à retour haptique, contraignant physiquement les mouvements du bras de l'opérateur. Cependant, pour limiter une surexploitation des interfaces technologiques et conserver une interaction naturelle avec l'EV, nous avons décidé de ne pas appliquer ce type de technologie dans notre dispositif. Pour tenter d'**optimiser le ressenti des contraintes physiques du sujet**, nous nous intéressons ici à l'utilisation du pseudo-haptique. L'objectif est de **créer une illusion d'effort chez l'utilisateur immergé** (aucun stimulus extérieur), et ce sans interface physique. Ainsi les mouvements sont non contraints et l'interaction du sujet avec l'EV plus naturelle.

Le principe appliqué pour le mouvement d'extension de l'avant-bras est schématiquement représenté Figure 7-10. L'opérateur en immersion réalise un mouvement impliquant une extension de l'avant-bras. Sans modification spécifique, le mouvement perçu virtuellement est identique à celui effectivement réalisé. À partir d'un certain angle d'extension (correspondant par exemple à une limite articulaire du sujet simulé), la cinématique de l'avant-bras du mannequin est modifiée de sorte à ce que l'extension de celui-ci soit moins rapide que l'extension réelle. Ainsi, l'opérateur immergé doit réaliser davantage de mouvement pour effectuer virtuellement la tâche voulue, entraînant un sentiment d'effort plus important.

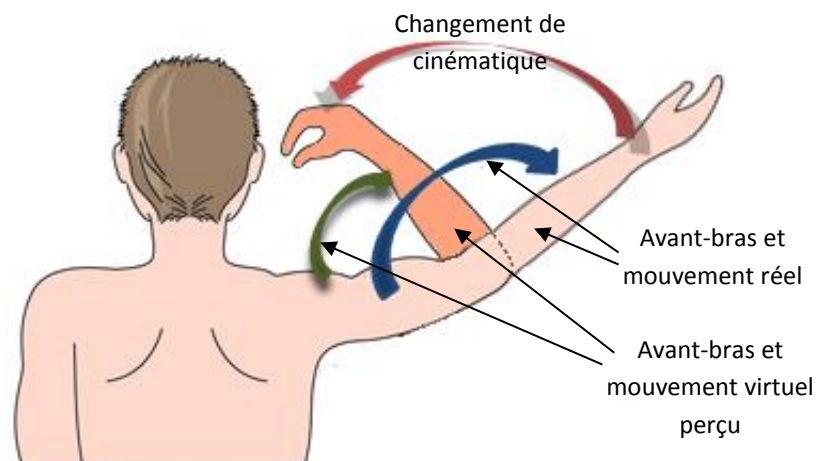


Figure 7-10. Principe du pseudo-haptique appliqué à l'extension de l'avant-bras.

Une première simulation pseudo-haptique appliquée à l'extension de l'avant-bras a été développée. Le principe est présenté en Annexe H. Le changement de cinématique est couplé à une modification de couleur du membre concerné (avant-bras) dans le but de renforcer la sensation d'effort. Ainsi, plus l'angle d'extension s'éloigne de l'angle limite acceptable, plus l'avant-bras se colore

progressivement, passant d'une apparence neutre, à une coloration rouge. Ces travaux montrent des résultats encourageants, même si le changement de cinématique appliquée montre des signes d'instabilités pour des angles de flexions et d'extensions extrêmes. Des développements basés sur la cinématique inverse du bras pourraient permettre d'optimiser la simulation. Des études perceptives devraient également être menées pour quantifier l'impact réel de cette approche sur le ressenti des efforts par l'opérateur en immersion. Le changement de cinématique à appliquer est un point essentiel devant être étudié pour permettre un retour pseudo-haptique le plus efficace possible.

Bien entendu, les contraintes réellement ressenties par le sujet présentant des déficiences dépendent de nombreux paramètres difficiles à simuler. Une limitation articulaire due à une fracture ou à une arthrose avancée par exemple n'entraînera pas les mêmes troubles. Nous pensons toutefois que le développement de cette approche pourrait être un moyen efficace d'améliorer le ressenti de déficiences articulaires sur les mouvements du sujet.

7.3.2 Prototypage temps réel en RV

Le dispositif développé permet de modifier automatiquement les caractéristiques de l'utilisateur cible durant les phases immersives. Ainsi, l'opérateur peut facilement simuler l'activité de plusieurs sujets différents, et évaluer le prototype virtuel sans rompre l'immersion. Pour **optimiser l'évaluation et la conception du couple produit/usage** en RV, il nous paraît essentiel de permettre également la **modification en temps réel du prototype**, directement dans l'EV, pour répondre à un cahier des charges définissant des configurations précises à évaluer. Les membres de la conception doivent pouvoir traduire et appliquer le plus efficacement possible les recommandations (objectives et subjectives) émises lors des évaluations, et ce directement sur le concept étudié. Les choix de conception pourront ainsi être vérifiés et testés instantanément dans l'EV.

Classiquement, les modifications à apporter sont réalisées sur le modèle numérique en dehors des phases de réalité virtuelle. Les modifications sont précises et quantifiées, mais impliquent une coupure des phases immersives en RV pour changer le modèle natif. Une autre approche retrouvée chez certains auteurs (Mahdjoub et al. 2010) propose de manipuler les éléments virtuels (positions et orientations) directement en RV, par l'opérateur immergé interagissant avec l'EV (déplacement d'objets par des gants de données par exemple). Cependant, ce type de conception en RV est, de façon pratique, souvent difficile à appliquer pour des modifications quantitatives aisées et précises. Dans notre cas, nous proposons de tirer parti de ces deux approches en proposant une modification du prototype virtuel, effectuée directement lors de phases de RV, permettant une analyse continue mais sans intervention directe de l'opérateur immergé.

À partir des recommandations des membres de l'équipe de conception, l'expert métier sur l'ordinateur (Figure 7-3), peut modifier de manière quantifiée la position et l'orientation du prototype et des éléments de l'EV. Les modifications sont directement appliquées dans l'EV et l'opérateur immergé peut se concentrer sur l'évaluation de la nouvelle configuration. Ces modifications sont réalisées manuellement par le biais de l'environnement de travail de Unity3D, permettant la gestion des éléments dans l'espace. Cependant, en plus du déplacement en position et orientation, nous proposons la modification rapide des dimensions du prototype.

En reprenant l'exemple du prototype virtuel utilisé dans l'expérimentation 1, les variables dimensionnelles clés peuvent être définies par 1) la hauteur du plan de travail, 2) la profondeur du plan de travail, 3) la hauteur de placard, et 4) la profondeur de placard. Ces variables représentent les données principales permettant de définir et d'étudier le système « plan de travail-placards » de la cuisine. Encore une fois, l'analogie peut être faite avec d'autres produits, comme dans le cas de l'étude d'un poste de travail, où l'ergonomie de travail est souvent réalisée par la modification d'une ou plusieurs variables dimensionnelles du poste.

Une interface a donc été intégrée dans l'environnement virtuel, permettant d'assurer la modification in situ du prototype virtuel (Figure 7-11). Celle-ci a été développée sous le langage de programmation C#, directement intégré à l'environnement logiciel. Elle permet de faire le lien entre les données indiquées par les concepteurs, et les éléments virtuels désirés. Les variables à modifier sont respectivement définies en entrée du programme, et dans l'EV par les concepteurs. L'initialisation des données doit ainsi être effectuée pour chaque nouveau prototype. Une fois cette étape achevée, les concepteurs peuvent directement modifier les paramètres dimensionnels clés du prototype, à partir de l'interface. Les données sont indiquées de manière précise (en mètres) et retranscrites automatiquement au produit. Ces modifications peuvent être appliquées à un préconcept, un concept détaillé, ou à un produit existant. Le programme permet d'appliquer les dimensions indiquées par les concepteurs, tout en gardant une cohérence d'échelle dans la représentation de la maquette. Par exemple, une augmentation de la hauteur du plan de travail, engendrera également un allongement automatique de la hauteur des portes associées. Ceci permet de conserver une visualisation cohérente du produit. A noter cependant que dans le cas de produit plus complexe, l'interdépendance des différentes variables dimensionnelles peut rendre difficile cette mise à l'échelle et la modification automatique du prototype.



Figure 7-11. Interface permettant au concepteur de modifier en temps réel les variables dimensionnelles clés de l'environnement étudié.

Une telle approche fournit donc un support pour faciliter la transformation des données objectives et subjectives en modifications quantifiées. Elle permet une analyse qualitative et quantitative rapide de nombreuses variations dimensionnelles du prototype étudié. Les concepteurs peuvent avoir une évaluation instantanée de leurs choix de conception (modifications apportées au prototype), et les impacts sur l'usage du produit, constituant un moyen efficace de rétroaction (vérification) des idées de conception. À noter que les paramètres fonctionnels à modifier peuvent être plus difficile à

déterminer dans certains cas plus complexes, présentant de grandes interdépendances entre les variables.

La combinaison de l'interface utilisateur présentée paragraphe 6.6.1 et de cet outil de modification permet la **définition des données dimensionnelles liées au prototype, ainsi que les caractéristiques liées au sujet (mannequin), directement dans l'EV** (Figure 7-12). Les membres de l'équipe de conception peuvent donc **modifier les paramètres du système « Homme-virtuel, Produit-virtuel, Environnement-virtuel » sans rompre la phase d'évaluation immersive** en RV. Le dispositif contribue ainsi à **optimiser l'analyse du couple produit/usage, en prenant en compte les caractéristiques physiques et anthropométriques des utilisateurs finaux**.

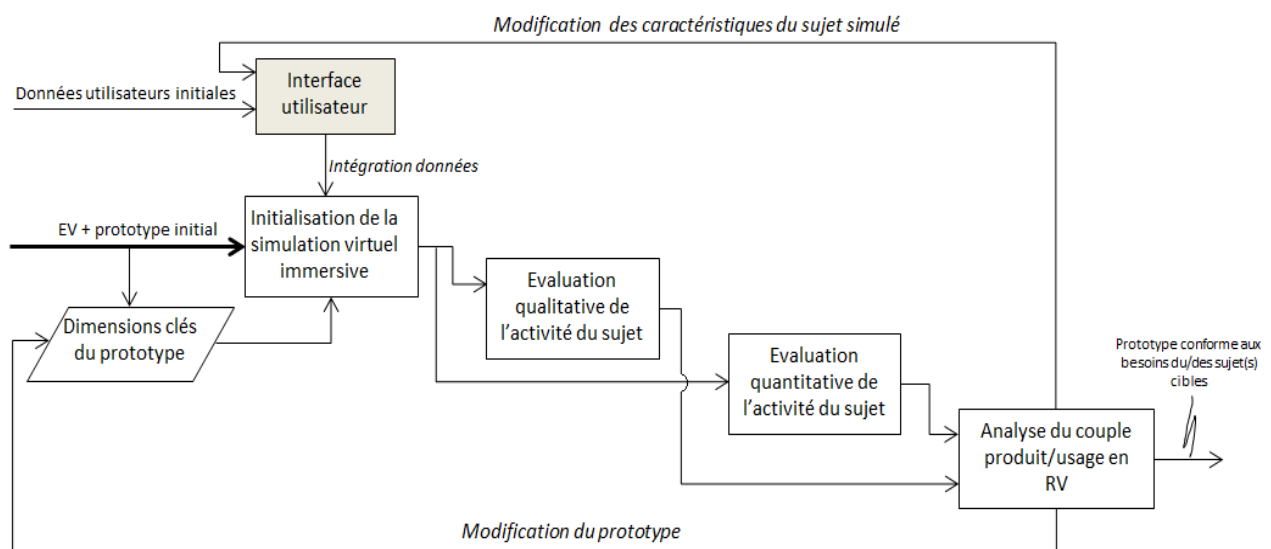


Figure 7-12. Prototypage en temps réel du produit et définition des caractéristiques du mannequin virtuel pour l'analyse du couple produit/usage en RV. Les modifications sont réalisées directement dans l'EV sans rompre la phase d'évaluation immersive.

Le prototypage temps réel permet aux concepteurs de tester et d'évaluer plusieurs configurations de produits, et donc plusieurs activités/tâches réalisées par le mannequin. Ces activités peuvent également être évaluées pour plusieurs types de déficiences et capacités motrices spécifiques. De nombreuses données, à la fois liées au produit, aux activités, et aux capacités de l'utilisateur, peuvent alors être visualisées par les acteurs de la conception.

Dans la partie suivante, nous proposons de développer un outil pour aider les concepteurs à agréger ces données, et à émettre des conclusions sur les évaluations réalisées.

7.4 Outil complémentaire d'analyse des déficiences et de l'usage

7.4.1 Introduction

La visualisation en temps réel des capacités physiques spécifiques permet de simuler l'usage futur du produit. L'adaptation de l'opérateur aux informations visuelles perçues a permis, dans le cas d'étude

précédemment présenté, d'anticiper les stratégies de compensation mises en œuvre par l'utilisateur, et ainsi d'avoir accès à l'usage futur du produit. En effet, comme démontré partie 7.2, l'activité définissant l'usage dépend de la relation complexe existant à la fois entre les caractéristiques dimensionnelles du produit, de l'utilisateur (anthropométrie), ainsi que les capacités physiques de celui-ci (Figure 7-13).

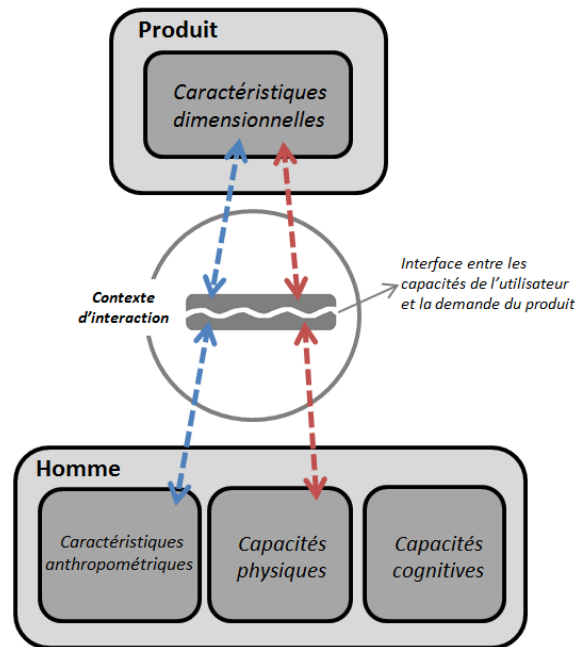


Figure 7-13. Interdépendance entre les données dimensionnelles du produit, les caractéristiques anthropométriques du sujet et ses capacités physiques, définissant l'interaction entre l'utilisateur et le produit utilisé (inspiré de Persad et al. (2007)).

Le cas étudié paragraphe 7.2.4 (limitation articulaire dans une tâche d'atteinte) est représentatif d'un problème de conception où la déficience motrice du futur utilisateur était connue et bien définie. Dans ce cas, les concepteurs peuvent prendre des décisions de conception, basées sur les caractéristiques spécifiques étudiées (déficience de l'avant-bras). Or, dans certains cas (comme dans une approche de conception *pour tous* par exemple), plusieurs utilisateurs présentant des déficiences différentes, peuvent être amenés à utiliser le produit. Pour prendre en compte ces différences de capacités, les concepteurs peuvent donc s'appuyer sur le dispositif et les outils de visualisation développés. Ils observent, pour chaque déficience, l'impact sur l'usage et sur la conception du produit. Ainsi, il est par exemple possible d'observer si une déficience au niveau du tronc aurait eu un impact sur l'usage du produit, au même titre que la déficience de l'avant-bras étudiée. Cependant, cela implique de répéter le protocole d'évaluation pour chaque déficience étudiée (niveau de capacité, localisation de la déficience, etc.). De plus, dans le cas où les concepteurs doivent évaluer plusieurs tâches et plusieurs configurations, le nombre de données observées à analyser peut devenir important.

Pour tenter d'optimiser cette analyse du couple produit/usage, appliquée à un nombre important de variables, nous avons défini une interface, couplée à un protocole d'évaluation basé sur la visualisation des déficiences motrices.

Les déficiences sont appliquées à tous les membres (flexion du tronc, de l'avant-bras, abduction du bras, et extension de l'avant-bras). L'opérateur interagit cette fois-ci naturellement avec le prototype, sans prendre en compte les retours visuels sur la « coloration » des membres du mannequin lors de la simulation de l'activité. Ceci permet de réaliser naturellement les tâches, tout en prenant connaissance des déficiences mises en jeu. Les différentes déficiences impliquées durant l'activité sont observées en utilisant le retour visuel (coloration des membres concernés). Il est alors possible de connaître rapidement celles qui auront un impact sur l'usage du produit. Pour agréger ces données, une interface a donc été développée.

7.4.2 Interface développée

L'interface a pour objectif de permettre aux concepteurs de relever les déficiences visualisées lors des évaluations, et ce pour chacune des activités du mannequin. Une première fenêtre permet ainsi de définir les différentes activités de l'utilisateur. Les couleurs observées pour chaque membre peuvent ensuite être facilement renseignées, comme représenté Figure 7-14. Elles correspondent aux dépassements des capacités motrices, c.à.d. les amplitudes de mouvement ne respectant pas celles admissibles par le sujet. Ces amplitudes articulaires sont définies en fonction du niveau de déficience, comme présenté dans le Tableau 6-4. La zone blanche représente ainsi une amplitude de mouvement respectée (pas de coloration au niveau du mannequin virtuel), la zone jaune correspond à un dépassement de moins de 15% de l'amplitude maximale admissible par le sujet, la zone orange à un dépassement de moins de 30%, et la zone rouge plus de 30%. Une fois les informations renseignées et validées, une autre fenêtre permet d'afficher le résumé des résultats de l'évaluation, sous forme de tableau (Figure 7-14) ou de graphique à barres (voir Annexe I). On peut ainsi rapidement connaître, pour chacune des tâches, quels mouvements n'ont pas respecté les capacités physiques de l'utilisateur, et dans quelle mesure ceux-ci ont dépassé les amplitudes maximales admissibles.

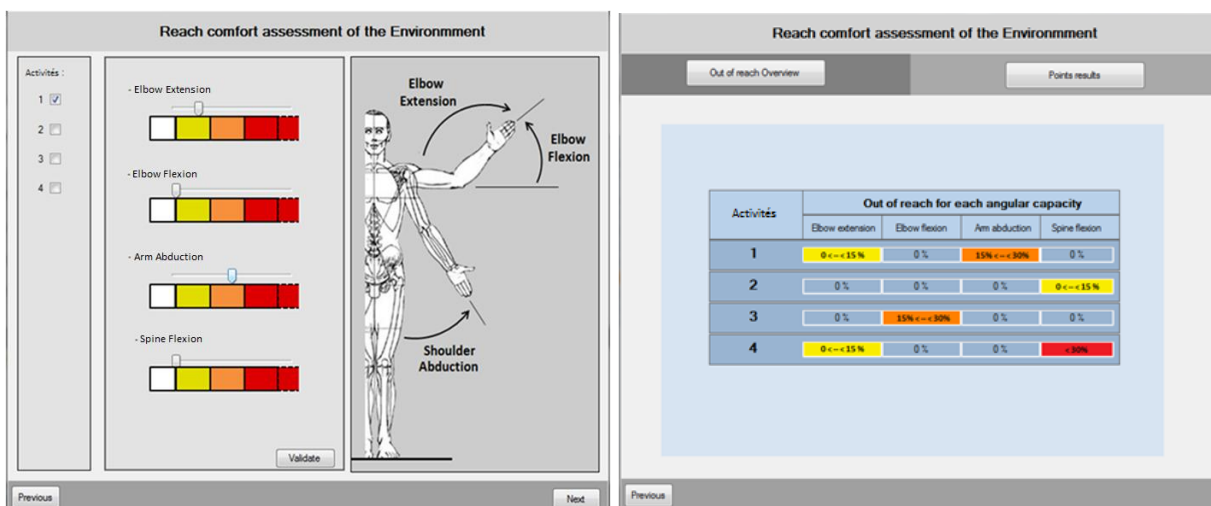


Figure 7-14. Gauche : indication des couleurs observées sur les membres du mannequin virtuel, pour chacune des activités étudiées. Droite : résumé des observations pour chaque mouvement des membres impliqués et chaque activité.

7.4.3 Mise en application

La démarche et l'interface développées ont été mises en application au travers d'un cas d'étude expérimental. Quatre étudiants-concepteurs, composés en équipe projet (comme partie 7.2), ont réalisé les évaluations. L'usage du produit a été évalué pour un utilisateur anthropométriquement représentatif d'un individu "moyen" (50^{ième} centile homme), et à partir du prototype étudié section 7.2. L'activité de l'utilisateur est simulée par l'opérateur pour chacune des tâches d'atteinte (point 1 à 4 représentés Figure 7-2).

Le Tableau 7-7 présente les résultats obtenus dans le cas de limitations modérées (limitations définies à partir du standard de l'ICIDH présenté Tableau 6-4). Les données représentent, pour chaque activité, les mouvements réalisés par le mannequin (abduction du bras, flexion du tronc, extension et flexion du coude) ne respectant pas les capacités articulaires du sujet simulé. Ici par exemple, l'extension du coude mise en jeu pour réaliser la tâche d'atteinte n°2 sera entre 15% et 30% plus importante que celle admissible par le sujet. Ces résultats représentent ainsi une vue d'ensemble des différentes déficiences impliquées lors de l'activité, et donc celles qui auront une influence sur l'usage du produit étudié. On peut alors rapidement analyser qu'une limitation modérée de la flexion du tronc n'aura pas d'impact sur l'activité de l'utilisateur, qu'elle que soit la tâche effectuée. De même qu'une limitation modérée de l'abduction du bras ou de la flexion de l'avant-bras, ne limitera pas l'usage du produit. Dans ce cas, l'utilisateur pourra naturellement réaliser les tâches données, dans le spectre de ses capacités physiques (l'hypothèse étant fait que .

A contrario, une déficience modérée de l'extension de l'avant-bras engendrera une limitation ou un changement d'activité de l'utilisateur, pour les points 1, 2, et 4. Celui-ci devra adapter son comportement pour pouvoir réaliser les tâches. Au contraire, le sujet pourra réaliser la tâche 3 sans contrainte, même avec une limitation modérée. Cette situation correspond bien aux résultats trouvés précédemment (Figure 7-4) où l'intégration d'une déficience modérée chez le sujet a engendré une modification de posture (et une augmentation de l'inconfort), pour les tâches 1, 2, et 4, et non pour la tâche 3.

L'évaluation a également été effectuée pour des déficiences sévères (correspondant à une abduction de l'épaule comprise entre 0° et 90°, une flexion/extension du coude comprise entre 0° et 73°, et une flexion du tronc comprise entre 0° et 45°) (voir Tableau 6-4). Les résultats obtenus sont présentés Tableau 7-8. Cette fois, on peut voir qu'une limitation sévère de l'abduction du bras, aura un impact sur l'activité réalisée par l'opérateur lors de la tâche 4. Une limitation sévère de l'extension de l'avant-bras engendrera une modification importante de l'activité pour chacune des tâches, et ne permettra pas à l'utilisateur d'utiliser le produit, dans le spectre de ses capacités motrices.

Tableau 7-7. Résultat de l'analyse de l'activité en limitations modérées.

Activités	Out of reach for each angular capacity			
	Elbow extension	Elbow flexion	Arm abduction	Spine flexion
1	0% <-- <15%	0%	0%	0%
2	15% <-- <30%	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%	0%
4	15% <-- <30%	0%	0%	0%

Tableau 7-8. Résultat de l'analyse de l'activité en limitations sévères.

Activités	Out of reach for each angular capacity			
	Elbow extension	Elbow flexion	Arm abduction	Spine flexion
1	30% <--	0%	0%	0%
2	30% <--	0%	0%	0%
3	30% <--	0%	0%	0%
4	30% <--	0%	0% <-- <15%	0%

Au travers du protocole et de l'interface, il est ainsi possible d'**analyser clairement les déficiences motrices impliquées pour chacune des tâches à réaliser**. Les données fournissent des informations structurées sur **les déficiences ayant un impact direct sur l'usage du produit**, sur quelle activité en particulier, et dans quelle mesure (quantification). Une telle analyse peut s'avérer particulièrement intéressante lorsque le produit doit répondre aux besoins d'un panel varié d'utilisateurs, présentant des déficiences variées.

7.4.4 Comparaison de configurations

L'usage étant directement lié à la topologie du produit, ces analyses servent notamment à anticiper dans quelle mesure une configuration sera potentiellement plus exclusive pour l'utilisateur. Cette démarche peut ainsi être appliquée pour l'analyse de plusieurs topologies différentes du produit.

La Figure 7-15 représente les 4 points à atteindre pour trois configurations différentes du plan de travail de la cuisine. La configuration a) correspond au prototype évalué précédemment ; la b) correspond à une diminution de la hauteur du plan de travail et des placards de 0.2m ; et la c) à une augmentation de 0.2m. Toutes les dimensions sont disponibles en Annexe K. Comme précédemment, les évaluations ont été réalisées en relevant les colorations des membres à l'aide de l'interface. Les modifications de dimensions ont été directement effectuées dans l'EV par le biais des fonctionnalités développées auparavant paragraphe 7.3.2.

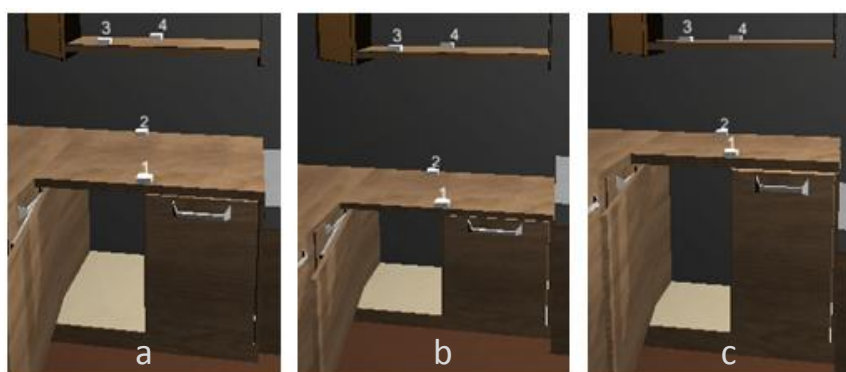


Figure 7-15. Trois configurations dimensionnelles différentes du prototype de cuisine (a, b, c). La configuration a) est celle étudiée précédemment.

Les Tableau 7-9 et Tableau 7-11 représentent les résultats obtenus pour une étude en limitations modérées des configurations b et c. Comme précédemment, on peut voir qu'une limitation de flexion de l'avant-bras, d'abduction du bras, ou de flexion du tronc n'aura pas d'impact sur l'usage du produit. Une limitation modérée de la flexion de l'avant-bras engendrera une modification de l'activité du sujet. Pour le prototype b, ce sont principalement les tâches 1 et 2 qui seront affectées, due à une diminution du plan de travail. Pour le prototype c, ce sont les tâches 3 et 4, à cause d'une augmentation de la hauteur des placards, rendant l'activité du sujet plus contraignante. Ces constatations sont soutenues sur les résultats en limitations sévères (Tableau 7-10 et Tableau 7-12), où la tâche 2 pourra être contrainte par

la capacité de flexion du tronc du sujet (prototype b), et les tâches 3 et 4 par la capacité d'abduction du bras (prototype c).

Tableau 7-9. Résultat de l'analyse de l'activité en limitations modérées pour la configuration b.

Activités	Out of reach for each angular capacity			
	Elbow extension	Elbow flexion	Arm abduction	Spine flexion
1	30%<--	0%	0%	0%
2	30%<--	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%	0%
4	15%<--<30%	0%	0%	0%

Tableau 7-10. Résultat de l'analyse de l'activité en limitations sévères pour la configuration b.

Activités	Out of reach for each angular capacity			
	Elbow extension	Elbow flexion	Arm abduction	Spine flexion
1	30%<--	0%	0%	0%
2	30%<--	0%	0%	0<--<15%
3	30%<--	0%	0%	0%
4	30%<--	0%	0%	0%

Tableau 7-11. Résultat de l'analyse de l'activité en limitations modérées pour la configuration c.

Activités	Out of reach for each angular capacity			
	Elbow extension	Elbow flexion	Arm abduction	Spine flexion
1	0%	0%	0%	0%
2	15%<--<30%	0%	0%	0%
3	30%<--	0%	0%	0%
4	30%<--	0%	0%	0%

Tableau 7-12. Résultat de l'analyse de l'activité en limitations sévères pour la configuration c.

Activités	Out of reach for each angular capacity			
	Elbow extension	Elbow flexion	Arm abduction	Spine flexion
1	30%<--	0%	0%	0%
2	30%<--	0%	0%	0%
3	30%<--	0%	15%<--<30%	0%
4	30%<--	0%	30%<--	0%

Il est ainsi possible d'analyser un grand nombre de tâches différentes, pour plusieurs configurations de produit, en ayant une vision globale de l'activité future de l'utilisateur. Les concepteurs peuvent évaluer rapidement l'inclusivité de la topologie par rapport à un panel important de capacités différentes. Dans notre cas d'application, on voit ainsi que le prototype *a* (initialement étudié) est celui ayant la configuration pouvant être considérée comme la plus inclusive. Les pourcentages affichés sont moindres que pour les configurations *b* et *c*, globalement plus exclusives pour l'utilisateur.

A noter que dans le cas d'application étudié, les capacités fonctionnelles critiques sont principalement liées à l'extension de l'avant-bras, car l'activité du mannequin est essentiellement définie par des tâches d'atteintes du haut du corps. Cependant, d'autres facteurs critiques pourraient être mis en jeu pour d'autres évaluations de produits et d'environnement à topologie plus complexe. Par exemple, dans le cas d'un poste de conduite d'une voiture, la flexion de l'avant-bras pour l'attache de la ceinture, ou la flexion des jambes pour l'atteinte des pédales seraient grandement sollicitées.

Les résultats sont définis à partir des limites maximales physiologiquement admissibles par l'utilisateur. On se base sur des gammes de limitations articulaires, représentant une diminution des capacités fonctionnelles engendrées par une déficience. Or, le comportement de l'utilisateur dépendra également de la spécificité et du type de handicap. En fonction de l'inconfort ressenti, celui-ci pourra être amené à changer sa posture avant même d'avoir atteint ses limites fonctionnelles

maximales. Cette multiplicité des situations de handicaps et leurs impacts sur l'utilisateur peuvent donc être difficiles à prendre en compte. Cependant, nous pensons que l'outil d'analyse présenté fournit un support efficace pour permettre aux concepteurs d'analyser clairement les déficiences principales influençant l'activité de l'utilisateur et l'usage du produit.

Il est important de noter que les tests virtuels présentés dans ce paragraphe ont été réalisés par deux opérateurs différents, ne présentant aucune déficience particulière. Dans notre cas d'étude, les résultats trouvés ont été identiques pour chacun d'entre eux et pour chacun des tests. Il est cependant nécessaire de souligner que les évaluations virtuelles réalisées restent intrinsèquement dépendantes des caractéristiques comportementales de l'opérateur. Celles-ci peuvent donc varier d'un individu à l'autre, et engendrer des comportements d'atteintes différents, surtout lors de combinaisons de mouvements complexes. Pour atteindre un point situé près du sol par exemple, certaines personnes plieront naturellement les genoux, lorsque d'autres courberont grandement le dos. Il est donc essentiel pour les concepteurs de considérer ces facteurs subjectifs, ainsi que les différentes stratégies pouvant être mises en œuvre sur certaines activités spécifiques.

Les différents cas d'applications présentées dans ce chapitre ont donc souligné l'intérêt du dispositif pour l'évaluation du couple produit/usage en RV. Nous proposons maintenant d'analyser qualitativement les apports et limites du dispositif, à partir des impressions des concepteurs ayant participé aux évaluations immersives expérimentales.

7.5 Evaluation qualitative du dispositif développé

Une étude qualitative a été menée auprès de 14 étudiants en conception et ergonomie, ayant utilisé le dispositif pendant plusieurs phases d'évaluations en RV. Chacun avait préalablement reçu, dans le cadre de travaux dirigés, une présentation du domaine de la réalité virtuelle, ainsi qu'une formation à l'utilisation des différentes interfaces comportementales et outils développés. Ils étaient répartis en équipe projet de 3 ou 4 personnes, et ont joué tour à tour les rôles d'observateur, d'acteur (opérateur), et d'observateur-acteur (concepteur sur l'ordinateur pouvant modifier les paramètres de la simulation), comme décrit Figure 7-3. L'environnement et le prototype virtuel présentés paragraphe 7.2.4 (à savoir la cuisine équipée et les quatre activités d'atteintes associées) ont été utilisés pour mettre en application le dispositif. Dans un premier temps, aucune tâche spécifique n'était imposée aux acteurs de la conception. Chacun pouvait ainsi prendre en main son rôle, dans un cadre non formel. Ensuite, chacune des quatre tâches d'atteintes (points 1, 2, 3, 4) a été réalisée, au travers de phases immersives d'une durée de 10mn. L'opérateur devait ainsi atteindre consécutivement chacun des points, en interagissant dans la peau de mannequins présentant différentes anthropométries (5^{ième} centile femme et 95^{ième} centile homme), comme présenté dans le paragraphe 7.2.2. A travers l'attribution de ces rôles, chaque étudiant-concepteur était ainsi responsable de la prise en compte des contraintes et objectifs associés au sein du processus de conception. Ainsi, l'observateur-acteur a été amené à modifier les paramètres d'évaluations (données anthropométriques du mannequin virtuel), et l'acteur (opérateur) à simuler l'usage dans l'EV, tout en écoutant les remarques et observations des observateurs.

Un questionnaire a été fourni à chacun d'eux à la fin des sessions, permettant de collecter leurs impressions sur l'utilisation du dispositif. Ce questionnaire, principalement composé de questions pour lesquelles les sujets ont répondu à l'aide d'une échelle de Likert en 4 points, est présenté en Annexe K. Les résultats sont présentés en Annexe L et discutés ci-dessous.

Les résultats de l'évaluation qualitative ont montré que 76% des participants ont trouvé une contribution positive du dispositif de réalité virtuelle, à l'évaluation du produit et de son usage. Cette appréciation globale est directement liée à deux aspects principaux fournis par le dispositif : l'infrastructure générale, et les simulations virtuelles développées. Concernant le premier point, les participants ont en effet considéré que la nature collaborative de l'évaluation, contribue à la recherche de solutions de conception, et favorise les discussions et échanges entre les différents acteurs de l'équipe. Il a ainsi été jugé que le dispositif a une influence significative sur la motivation du groupe à travailler ensemble.

Ensuite, les simulations immersives ont montré leurs intérêts dans le processus de conception. L'interaction dans la peau de mannequins représentatifs, et l'intégration de déficiences motrices et sensorielles, ont permis aux concepteurs de simuler l'usage du produit de façon réaliste. Les graphismes de l'EV et les comportements adoptés par le mannequin ont en effet été jugés réalistes par les concepteurs. Ainsi, la majorité des participants a considéré que le dispositif aide à découvrir et comprendre les besoins, capacités et attentes de personnes en situations de handicap, ou à des besoins spécifiques. 79% des interrogés ont d'ailleurs jugé l'infrastructure comme étant très utile pour soutenir et favoriser la conception d'environnements, dans une démarche universelle.

Outre ces finalités, il est essentiel d'avoir un retour sur l'utilisation même des outils par les concepteurs. D'un point de vue général, le dispositif et les outils de réalité virtuelle ont été jugés faciles à utiliser par les acteurs de la conception (57%). En revanche, nous pouvons noter que 36% d'entre eux ont estimé l'utilisation du matériel contraignant. Cette remarque est principalement due au fait de devoir disposer d'interfaces spécifiques et d'une salle dédiée, ce qui implique de ne pas pouvoir réaliser les évaluations "n'importe où", comme pour des simulations sur simple ordinateur. Cependant, nous pouvons noter que 80% des utilisateurs interrogés considèrent tout de même que l'apport du dispositif de réalité virtuelle dans le processus de conception, est supérieur à la contrainte matérielle engendrée.

Enfin, nous devons noter un point important à prendre en compte lors des phases d'évaluations, qui est la charge physique induite par l'utilisation des périphériques de réalité virtuelle. En effet, 71% jugent l'utilisation des périphériques de réalité virtuelle assez fatigante. Ceci est principalement lié à l'utilisation du casque immersif. Il est cependant important de souligner qu'une nouvelle génération de casque (non disponible au moment de la réalisation du questionnaire) constitue désormais le dispositif. Cette nouvelle technologie permet une visualisation plus réaliste de l'EV (meilleure résolution de l'image et diminution de la latence d'affichage), et donc une diminution de la charge physique et cognitive induite par son utilisation. Bien que des tests comparatifs n'aient pas été entrepris, les essais réalisés par la suite semblent montrer une amélioration significative du confort d'utilisation (notamment grâce à l'amélioration du rendu visuel). Cette question reste tout de même importante à prendre en compte, particulièrement pour optimiser le temps d'utilisation des technologies de réalité virtuelle, lors des phases d'évaluations immersives.

Cette évaluation qualitative donne une première analyse de l'utilisation du dispositif de réalité virtuelle développé. Les résultats obtenus soulignent l'intérêt de celui-ci dans l'évaluation de l'usage, et la prise en compte du facteur humain lors du processus de conception. Néanmoins, il est important de noter que cette étude ayant été réalisée sur un panel réduit d'étudiants-concepteurs,

des évaluations complémentaires, avec un panel plus important de concepteurs professionnels, devraient être réalisées pour valider et affiner les résultats obtenus.

7.6 Perspectives d'applications

L'approche d'évaluation immersive et collaborative fournie par le dispositif peut être appliquée à de nombreux problèmes de conception, que ce soit dans le cadre de produits nouveaux ou de produits existants. L'interaction naturelle dans l'EV peut être particulièrement bien adaptée pour l'évaluation d'environnements à topologie complexe, comme dans le cas de l'évaluation ergonomique d'un poste de conduite.

L'optimisation de l'intérieur des voitures et de leurs tableaux de bords est en effet un sujet majeur pour l'industrie automobile. Pour donner un exemple concret, lors de la conception d'une voiture, il est nécessaire de valider des éléments tels que le champ de vision du conducteur, ou la disposition des éléments de commandes sur la planche de bord. Pour effectuer cette évaluation, les ergonomes peuvent classiquement disposer des mannequins virtuels en position dans la maquette numérique et visualiser leurs champs de vision, ainsi que leurs zones d'atteintes. Cette évaluation apporte des données quantitatives, mais ne permet pas d'obtenir d'éléments qualitatifs tels que la facilité d'utilisation des commandes de la planche de bord (positionnement des boutons, etc.). Afin d'obtenir ces données qualitatives, les ergonomes doivent donc soit prendre mentalement la place des mannequins et s'appuyer sur leur expérience personnelle pour juger de ces éléments, soit multiplier le nombre de maquettes physiques à l'échelle 1 afin de récolter ces données. L'évaluation immersive telle que proposée ici permet d'optimiser les évaluations qualitatives (subjectives) et quantitatives (objectives) réalisées dans l'EV.

La Figure 7-16b représente une modélisation 3D de l'intérieur d'une voiture dans l'environnement de Unity3D. L'opérateur doit ici représenter et simuler virtuellement l'activité du conducteur en position assise. Pour une simulation réaliste il est nécessaire, contrairement à l'étude présentée précédemment, de lui fournir un minimum de retours physiques, lui permettant de se représenter l'assise du siège et la position des pieds sur les pédales (Figure 7-16a). Les retours sensoriels sont ainsi cohérents, et l'opérateur peut se représenter la position du conducteur de manière naturelle et réaliste.



Figure 7-16. a) Position réelle de l'opérateur immergé simulant l'assise du conducteur dans l'EV. b) représentation virtuelle de la position du mannequin dans l'EV.

L'immersion visuelle lui permet d'avoir un ressenti sur l'encombrement général de l'intérieur de la voiture. Il peut analyser la visibilité de la route depuis le siège conducteur, ou encore la position et

l'apparence des commandes du tableau de bord. L'avantage par rapport à un système non immersif est que l'analyse est réalisée de façon dynamique. L'influence d'un changement de propriété d'un élément sur le mannequin peut être observée en temps réel, permettant de savoir par exemple si le transfert d'information entre les commandes et le pilote/conducteur est efficace. De plus, l'impact des conditions extérieures (mouvement de l'environnement, conditions visuelles et/ou sonores spécifiques, etc.) sur le conducteur peut être également étudié. Le bruit, la luminosité ou les mouvements ressentis dans des transports en commun peuvent influencer le transfert d'information entre l'environnement et le sujet. L'interaction naturelle avec l'EV permet en outre l'étude de l'accessibilité et du confort des commandes à l'intérieur du véhicule.

Encore une fois, les concepteurs pourront de même observer et analyser les postures et gestes du mannequin avec un point de vue extérieur. Les positions de conduite pourront ainsi être étudiées, et l'observateur acteur aura la possibilité d'analyser plus finement l'encombrement du conducteur dans la voiture (position de jambes par rapport au volant par exemple) (Figure 7-16). L'intégration et la visualisation des contraintes, ainsi que les outils développés, pourront permettre l'analyse de certaines tâches par rapport aux capacités physiques du conducteur. Par exemple l'accessibilité à la boîte à gants (Figure 7-17), ou la prise de la ceinture de sécurité positionnée au-dessus de l'épaule (Figure 7-18).

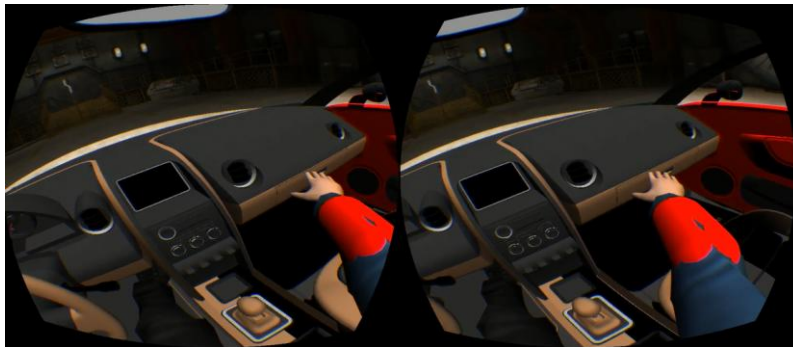


Figure 7-17. Observation immersive (opérateur) d'une déficience au niveau de l'avant-bras lors de l'atteinte de la boîte à gants par le conducteur (capture d'écran de la vision du casque immersif).

Une telle approche pourrait par exemple contribuer au développement de nouvelles interfaces personnalisables et personnalisées, adaptées aux capacités physiques des utilisateurs. L'objectif étant de concevoir des voitures plus accessibles physiquement, et à long terme des véhicules pouvant s'adapter aux besoins de leurs conducteurs et de leurs passagers.

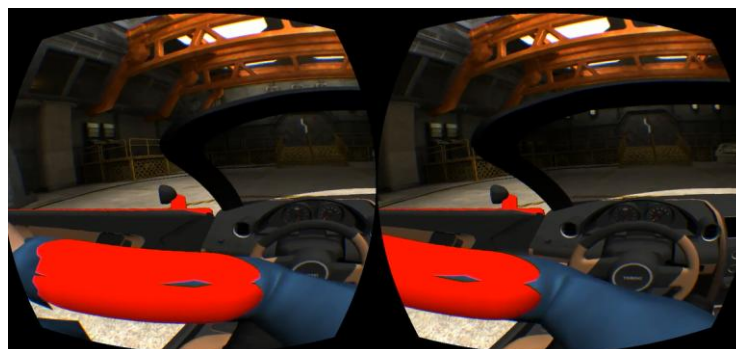


Figure 7-18. Observation immersive (opérateur) d'une déficience au niveau de l'avant-bras lors de l'atteinte de la ceinture de sécurité par le conducteur (capture d'écran de la vision du casque immersif).

Nous avons vu que dans ce cas d'étude, les retours physiques sont essentiels pour simuler de façon cohérente l'assise du conducteur. Ainsi, le comportement du mannequin dans l'EV peut être simultanément défini par des informations venant du monde réel et du monde virtuel. La Figure 7-19 représente schématiquement les données définissant le comportement du mannequin. Celui-ci est directement lié au comportement de l'opérateur. Ainsi, toute contrainte physique du monde réel s'appliquant sur l'opérateur est répercutée sur le mannequin. L'action du monde réel est donc directe sur l'opérateur, et agit de manière déportée sur le mannequin.

De plus, l'information perçue au-travers du casque immersif agit également sur l'opérateur, et donc sur le mannequin. Cela correspond au cas d'étude présenté paragraphe 7.2.4.2, où la visualisation des limites fonctionnelles du sujet a engendré une modification de posture de l'opérateur. Dans ce cas, le changement n'est donc pas directement appliqué sur l'axe moteur (capacité motrices et physiques) de l'opérateur, mais à partir de l'axe cognitif. Enfin, il est également possible de contraindre directement le mannequin dans l'EV. C'est par exemple le cas du pseudo haptique présenté paragraphe 7.3.1, où le changement de cinématique est directement appliqué aux membres du mannequin. Le dispositif permet par conséquent un échange d'informations constant entre le monde réel et le monde virtuel. Cette relation autorise une définition naturelle du comportement du mannequin, et donc une simulation robuste de l'activité de l'utilisateur et de l'usage du produit.

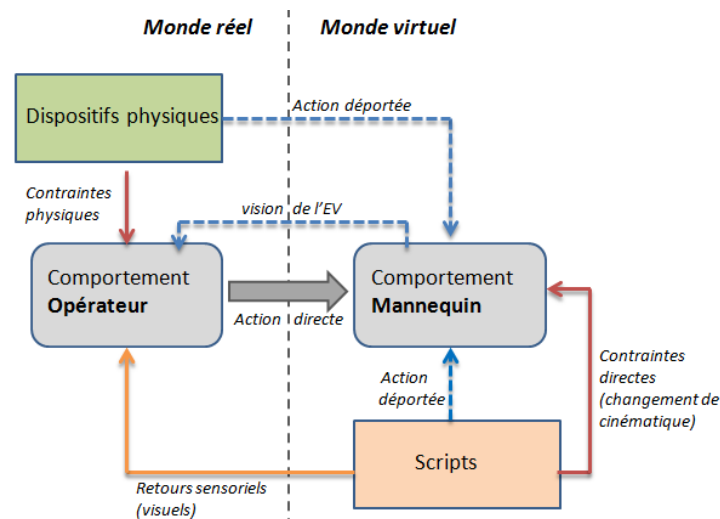


Figure 7-19. Représentation schématique des interactions entre le monde réel et le monde virtuel définissant le comportement du mannequin virtuel.

Le dispositif pourrait ainsi être appliqué à de multiples problèmes de conception, allant de l'évaluation d'un environnement confiné tel que l'intérieur d'une voiture, à l'agencement intérieur d'un établissement recevant du public, tel qu'un hôpital.

7.7 Conclusion

Le dispositif permet aux concepteurs de réaliser des évaluations à la fois qualitatives et quantitatives du produit et de son usage, et ce à partir des caractéristiques de l'utilisateur. L'analyse de plusieurs points de vue constitue un système d'évaluation collaborative, permettant une mutualisation des

compétences des différents experts métiers, autour du dispositif de RV. L'activité du sujet est simultanément évaluée et analysée de façon objective et subjective par l'ensemble des membres de la conception. Le retour d'information en temps réel permet de **simuler et anticiper les stratégies de compensations mises en œuvre par les personnes en situations de handicaps (limitation d'activité et déficiences visuelles)**. Ils peuvent ainsi construire, simuler, et évaluer l'activité de l'utilisateur ayant des capacités physiques spécifiques, de la manière la plus proche possible de la situation d'usage future, même pour des produits n'existant pas encore.

L'activité de l'utilisateur est simultanément étudiée d'un **point de vue normatif** (zone de confort ergonomique), **et spécifique** (limitations physiques particulières). Ainsi, les concepteurs peuvent étudier de manière quantitative et en temps réel l'impact de déficiences physiques sur l'activité de l'utilisateur, et sur le confort ergonomique des postures adoptées (méthode RULA). Il est ainsi possible de prévoir les risques de troubles musculo squelettiques résultant indirectement d'une situation de handicap. Les outils développés permettent également aux concepteurs de capitaliser les données liées aux capacités physiques du sujet. Ils peuvent **analyser clairement les types de limitations motrices mises en jeu lors de l'usage, et ainsi évaluer le produit pour un panel de capacités motrices différentes**.

Le **prototypage virtuel temps réel** permet une modification en continu du prototype, directement dans l'EV. La transition entre la définition initiale de l'idée de conception, et le développement du prototype devant démontrer le concept, est réalisée de manière quasiment instantanée. Ainsi, les concepteurs peuvent directement représenter, tester, puis valider ou infirmer les solutions proposées. De plus, l'interface développée Chapitre III donne également la possibilité de **modifier les caractéristiques du mannequin** durant les évaluations en RV. Les concepteurs peuvent ainsi définir instantanément les données liées à la fois au prototype et à l'utilisateur, sans rompre les phases d'évaluation en RV. Les idées émises peuvent être plus facilement testées et combinées entre elles, pour converger vers des solutions répondants aux besoins et attentes des utilisateurs finaux. Ceci contribue à **optimiser l'évaluation du produit et de son usage**, et donc à optimiser l'utilisabilité de celui-ci (plus efficient et satisfaisant pour l'utilisateur). Ceci a été confirmé par l'étude qualitative, soulignant l'apport du dispositif dans la conception du couple produit/usage en RV.

A noter que le dispositif n'est pas destiné à remplacer les moyens de conception actuels, mais à être utilisé en collaboration pour optimiser le processus de conception. Cette évaluation immersive et collaborative permet d'explorer le concept virtuel et d'évaluer efficacement la validité de certains points de conception, et ainsi converger plus rapidement vers des formulations préférables pour des tests sur maquettes physiques. A noter également que les interfaces comportementales utilisées ici ne permettent pas de simuler des situations de préhension et de manipulation précises avec les éléments de l'EV. Ceci pourrait cependant être réalisé avec l'utilisation d'interfaces permettant de détecter précisément les mouvements des mains (gants de données, etc.) et de les inclure dans la simulation (projet "Control VR"⁹ par exemple).

Il serait également envisageable de pouvoir impliquer le futur utilisateur directement dans le processus, durant les phases de simulations et d'évaluations immersives. Cependant, des investigations supplémentaires devraient être menées pour analyser l'utilisabilité de ce type de dispositif de RV dans le cas d'utilisateurs en situation de handicap. En effet, bien que le dispositif ait

⁹ <http://idialab.org/oculus-rift-and-leap-motion-demo/>

été conçu pour permettre une utilisation la plus naturelle des outils de RV (vision et mouvements libres), l'adaptation à certains types de handicaps devrait tout de même être étudiée.

Le dispositif développé permet donc de soutenir les concepteurs dans l'intégration et la prise en compte des caractéristiques physiques spécifiques des personnes ayant des déficiences, dans le processus de conception centrée sur l'utilisateur. Nous proposons dans la partie suivante, une discussion sur les enjeux et apports **de l'application du dispositif, dans le contexte spécifique de la conception pour tous**. Nous proposons ainsi une approche de conception, **basée à la fois sur une vision de conception inclusive, et sur notre méthodologie proposée chapitre I** (Figure 7-20).

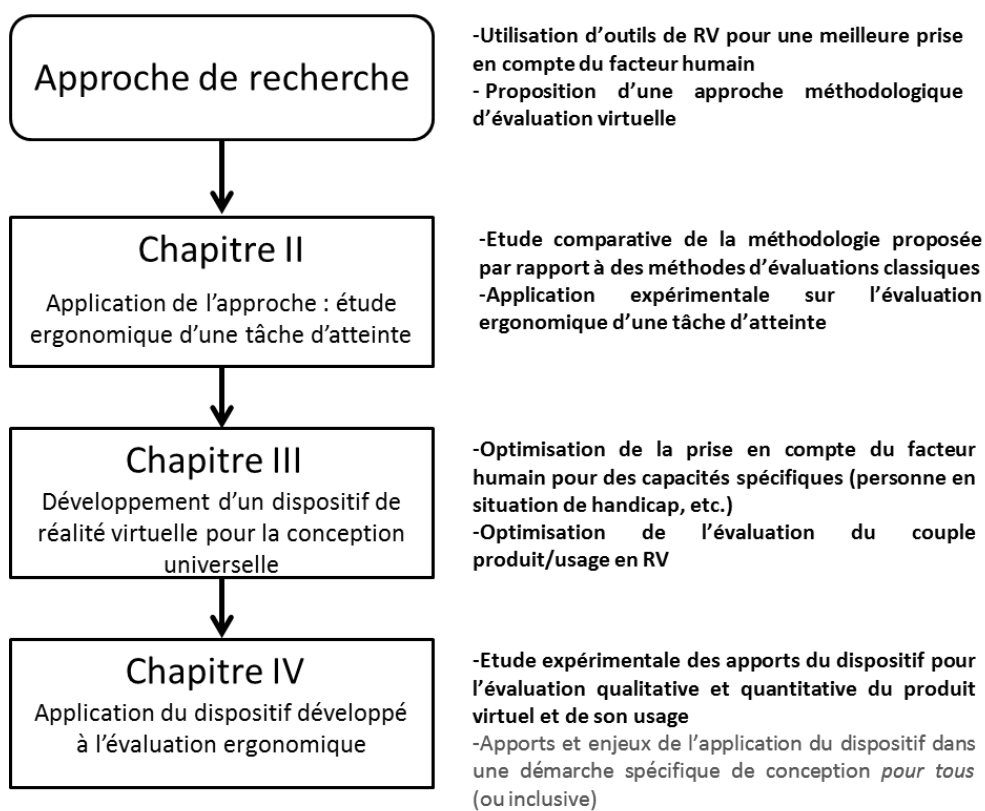


Figure 7-20. Représentation des différents chapitres et points précédemment développés.

8 Dispositif de réalité virtuelle dans une approche de conception inclusive

Dans la partie précédente, nous avons présenté l'application expérimentale du dispositif, dans un contexte de conception centrée-utilisateur. Nous avons ainsi souligné les apports de celui-ci dans l'évaluation du couple produit/usage, notamment pour les personnes à besoins spécifiques. Nous proposons dans cette dernière partie de faire le bilan des apports et enjeux des travaux réalisés, dans le contexte spécifique de la conception *pour tous*, ou plus précisément de la conception *inclusive*. Dans ce cadre, nous proposons notamment une approche basée sur l'utilisation du dispositif et de la méthodologie présentée chapitre I, permettant d'intégrer de manière structurée, le plus grand nombre d'utilisateur dans le processus de conception. Enfin, nous discuterons des difficultés de la prise en compte quantifiée et systématique de la variabilité humaine, et proposerons une perspective d'approche pour optimiser cette prise en compte.

8.1 Apports du dispositif

8.1.1 Activités de conception

Comme pour une conception centrée utilisateur, la conception de produit *pour tous* nécessite de prendre des décisions sur le produit, dès le stade de préconcept. Il est pour cela nécessaire d'analyser au mieux les besoins, attentes, et caractéristiques spécifiques des utilisateurs, au plus tôt et tout au long du processus. D'un point de vue général, et d'après le modèle de la conception inclusive (Waller et al. 2015), ceci passe par un processus itératif combinant des phases d'exploration, de création, et d'évaluation des concepts : l'objectif étant de mieux comprendre le problème de conception, soutenir la prise de décision, et évaluer les concepts avant toute prise de décision importante.

D'après cette vision de conception inclusive, le dispositif développé permet de soutenir les concepteurs durant ces différentes phases et activités de conception (Figure 8-1). En **phase de création**, il permet ainsi la simulation de *scénarii* d'usages, l'échange d'idées et la modification du produit étudié (chapitre IV, partie 7.3). En **phase d'évaluation**, il permet de réaliser des tests expérimentaux par différents experts métiers, et autour d'une représentation virtuelle mais néanmoins réaliste, de l'utilisateur et de son activité. Classiquement, ces évaluations sont réalisées par le biais d'observations et de tests utilisateurs sur prototypes physiques, c'est-à-dire souvent appliquées à des produits existants (évaluation de l'inclusivité ou reconception). Le dispositif permet ici d'évaluer et d'examiner le produit et son usage, dès la création de préconcepts virtuels, y compris sur des produits qui n'existent pas encore physiquement. En modélisant les capacités des utilisateurs, il permet également de mieux prévoir les causes potentielles d'exclusions, liées aux déficiences du sujet. En **phase d'exploration**, il permet d'observer l'utilisateur (ou du moins sa représentation numérique) en situation d'usage (simulée en réalité virtuelle). Il intègre une diversité d'utilisateurs, en fournissant un ensemble de mannequins couvrant un éventail important de sujets, et de contextes d'utilisations. Il permet aux concepteurs de se concentrer sur l'utilisateur et ses besoins, plutôt que sur des aspects purement technologiques.

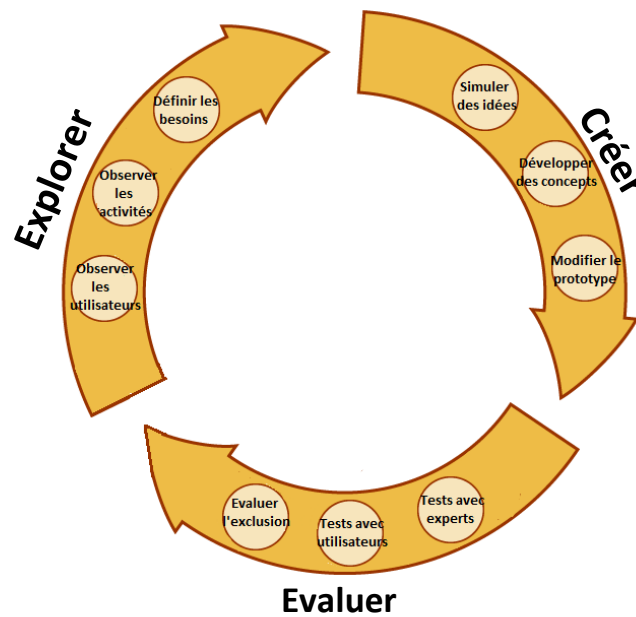


Figure 8-1. Apports du dispositif pour les phases d'exploration, de création, et d'évaluation de la conception (inspiré du modèle de conception inclusive de Waller et al. (2015)).

Ces simulations fournissent un support pour explorer virtuellement le problème de conception, et permettre un **réexamen du problème par les concepteurs** lors des phases amont du processus. Cet aspect est essentiel dans une optique inclusive permettant de favoriser la recherche de nouvelles idées de conceptions. Le dispositif supporte ainsi le processus inclusif durant les différentes activités de conception, et particulièrement sur l'un des enjeux clés d'une telle approche, à savoir la prise en compte de la variabilité humaine.

8.1.2 Prise en compte de la variabilité humaine

Variabilité anthropométrique

Dans le cadre de nos travaux, le dispositif permet de modéliser virtuellement un large spectre d'utilisateurs. L'interface développée chapitre III facilite la construction et l'intégration de mannequins numériques représentatifs des utilisateurs finaux, même pour des caractéristiques anthropométriques spécifiques. Les concepteurs peuvent ainsi simuler l'usage futur du produit pour un large spectre de la population, en termes de morphologie. Ceci permet d'explorer au mieux le problème de conception, en limitant les tests utilisateurs réels.

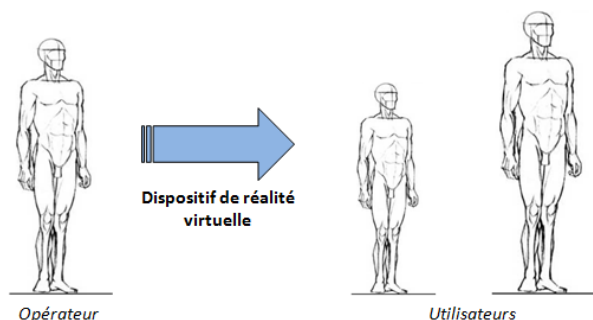


Figure 8-2. Modélisation de la variabilité anthropométrique des utilisateurs, grâce au dispositif de réalité virtuelle.

Variabilité des capacités

En plus de cette variabilité structurelle, un des enjeux d'une conception *pour tous* est également de développer des produits devant répondre aux besoins et attentes d'un grand nombre de personnes, ayant des niveaux de capacités (cognitives, sensorielles, motrices) pouvant être très différents. L'approche de conception inclusive (Keates & Clarkson 2004), préconise de prendre en compte les capacités physiques et déficiences spécifiques des utilisateurs, en intégrant des modalités d'interaction entre le sujet et le système étudié. Classiquement, ceci est effectué par le biais de tests et d'observations réels, impliquant des personnes en situation de handicap, des personnes âgées, etc. Comme présenté chapitre I paragraphe 2.5, des outils peuvent également être mis à disposition des concepteurs pour modéliser certaines déficiences, tels que des dispositifs physiques, ou des interfaces logicielles (Inclusive Design Toolkit¹⁰ par exemple).

Ici, les outils développés vont permettre de compléter et d'optimiser cette approche, en simulant virtuellement certaines déficiences et réductions de capacités, directement en RV. La boucle « perception, cognition, action » induit par le dispositif de réalité virtuelle, permet de modéliser de manière réaliste les modalités d'interactions souhaitées, et de les appliquer directement dans le processus. Les concepteurs peuvent ainsi mieux simuler l'activité de l'utilisateur ayant des besoins spécifiques, et donc avoir accès à l'usage futur du produit. Les évaluations sont effectuées avant même la création de prototypes physiques, en prenant au mieux en compte les situations de handicap. Les solutions proposées peuvent alors être plus à même de s'adapter aux personnes à besoins spécifiques.

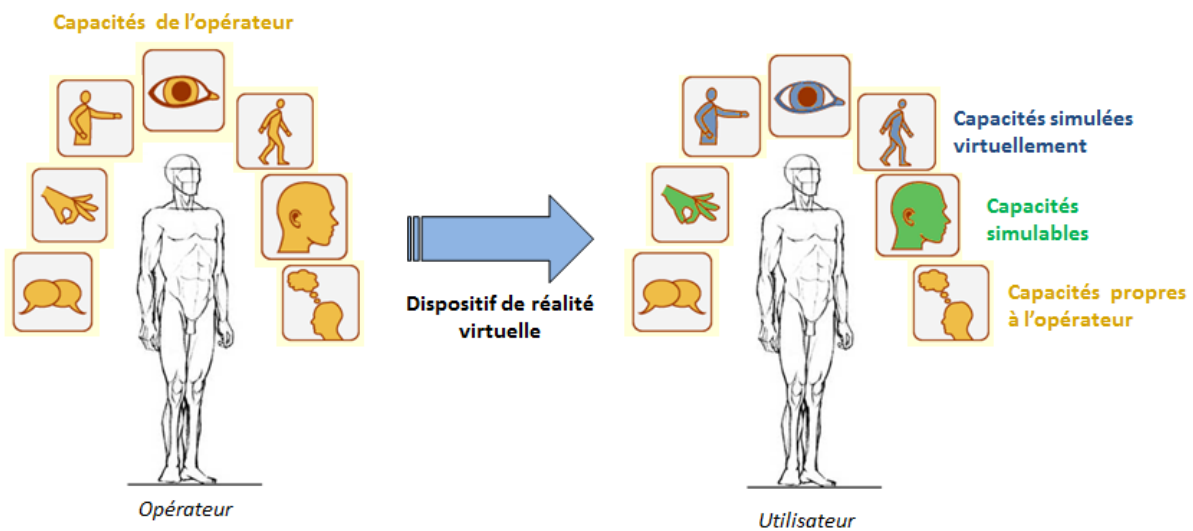


Figure 8-3. Modélisation et prise en compte des capacités de l'utilisateur par le biais du dispositif de réalité virtuelle. Les icônes représentent les différentes capacités motrices, sensorielles et cognitives de l'homme, à savoir (de gauche à droite) : communication, dextérité, atteinte, vision, mobilité, audition, et réflexion.

La Figure 8-3 représente le spectre des capacités des utilisateurs finaux simulés par le biais du dispositif de réalité virtuelle. Comme présenté précédemment, le dispositif permet aux concepteurs de simuler certaines capacités motrices spécifiques, et donc l'activité future du sujet. De même pour

¹⁰ <http://www.inclusivedesigntoolkit.com/betterdesign2/>

la vision, où certaines déficiences visuelles sont modélisées numériquement, et perçues en temps réel par l'opérateur. Bien que non présenté dans ces travaux, il serait également envisageable de modéliser certains aspects liés aux capacités auditives, le dispositif permettant une gestion interactive des environnements sonores. La dextérité pourrait également faire l'objet de modélisation virtuelle, au même titre que la motricité en général. Cependant, nous pensons que des dispositifs physiques, tels que des gants de limitations articulaires¹¹ (Cardoso & Clarkson 2012; Clarkson et al. 2007), restent encore le plus à même de fournir une simulation robuste et efficace de ce type de limitation. Les capacités cognitives en générale sont cependant plus compliquées (voire impossible) à modéliser. Ainsi, alors que des développements permettent de virtuellement simuler certaines capacités sensorielles et motrices des utilisateurs, les capacités de raisonnement restent quant à elles intrinsèquement propres à l'opérateur.

Le dispositif de réalité virtuelle développé soutient ainsi la prise en compte de la variabilité des utilisateurs, que ce soit d'un point de vue anthropométrique ou capacitif. Une telle représentation de la population d'utilisateurs finaux étant possible, nous pensons qu'elle peut contribuer à **intégrer la variabilité humaine de manière structurée dans le processus.**

8.2 Prise en compte structurée de la variabilité humaine

Bien que la conception *pour tous* préconise la prise en compte d'utilisateurs finaux ayant des caractéristiques très différentes, en pratique, il reste difficile de représenter cette variabilité de sorte à couvrir le spectre de la population. Cette prise en compte de la variabilité relève en effet le plus souvent d'études de cas spécifiques, découlant de circonstances et problèmes très particuliers, plutôt que d'approches systématiques et structurées. Nous pensons donc qu'il est essentiel de permettre aux concepteurs d'explorer le produit et son usage, pour le plus grand nombre d'utilisateurs, au travers d'une prise en compte structurée de la variabilité anthropométrique et des capacités de la population.

8.2.1 Variabilité anthropométrique

Pour structurer la prise en compte de la variabilité anthropométrique, nous pouvons nous baser sur la définition de mannequins bornes, classiquement utilisés en conception centrée-utilisateur. Ces mannequins bornes font références à des représentations géométriques du corps, représentatif des valeurs "extrêmes" de la population. En effet, les dimensions anthropométriques pouvant être considérées comme normalement distribuées, il est possible de définir des données "représentatives" d'un certain pourcentage de la population. C'est la notion de centile, préalablement abordé dans nos travaux. Partant de ce principe, il est possible de borner cette diversité, pour tendre au mieux vers une représentation globale de la population. Des mannequins représentatifs des 5^{ème} et 95^{ème} centiles peuvent ainsi être utilisés pour représenter une part importante des utilisateurs. Dans le cadre de nos travaux, le dispositif et l'interface utilisateur (développés chapitre III paragraphe 6.6) permettent d'intégrer rapidement ces mannequins bornes, directement prédéfinis dans le système. Les concepteurs peuvent alors explorer le produit et son usage, pour un large spectre de caractéristiques morphologiques, et à partir d'un nombre limité de mannequins.

¹¹ <http://www.inclusivedesigntoolkit.com/betterdesign2/gloves/gloves.html>

Il est important de noter que ce spectre des 5^{ème} et 95^{ème} centiles ne représente bien évidemment pas 90% de la population. Ainsi, les enfants, les personnes très grandes, etc. ne sont pas inclus dans ce cadre. C'est pourquoi, en complément de cette approche structurée, il reste essentiel pour les concepteurs de ne pas ignorer certains utilisateurs également concernés par l'utilisation du produit. Ici, le dispositif permet de modéliser des sujets avec tous types d'anthropométrie (stature et membres supérieurs). Ainsi, les concepteurs ont la possibilité d'explorer, en fonction du problème étudié, le produit et son usage, pour des utilisateurs présentant des caractéristiques morphologiques « spécifiques ».

8.2.2 Variabilité des capacités

La prise en compte de la variabilité des capacités des utilisateurs est plus complexe, car elle dépend de nombreux paramètres potentiellement évolutifs dans le temps, et difficile à quantifier. Pour tenter de structurer et prendre en compte le mieux possible la variabilité de capacité de la population, nous nous basons sur l'approche de conception inclusive (Clarkson & Coleman 2015; Keates & Clarkson 2004). Cette vision aborde le principe de conception *pour tous*, à partir des **niveaux de capacités des utilisateurs**. Ceci est matérialisé par la pyramide de la conception inclusive Figure 8-4, représentant les différentes catégories d'utilisateurs en termes de capacités. Le segment inférieur de la pyramide définit ainsi les utilisateurs sans difficultés ni déficiences particulières, et le sommet les sujets présentant des déficiences sévères.

Cette vision distingue ainsi trois approches de conception complémentaires, définies en fonction des capacités, et permettant de couvrir les besoins de toute la population. On retrouve à la base de cette approche une conception basée sur une population d'utilisateur "idéaux", c'est-à-dire sans déficiences ou handicaps spécifiques. Cette catégorie a pour objectif une conception "grand public", devant inclure un large spectre de la population. On retrouve ensuite une conception devant répondre aux attentes de personnes ayant une diminution de capacité. Le but est de minimiser les difficultés d'adaptation des personnes présentant des déficiences faibles à modérées. Finalement, une conception spécifique, visant des utilisateurs ayant des besoins très particuliers, présentant une déficience sévère. La combinaison de ces approches doit ainsi permettre une couverture complète de la population.

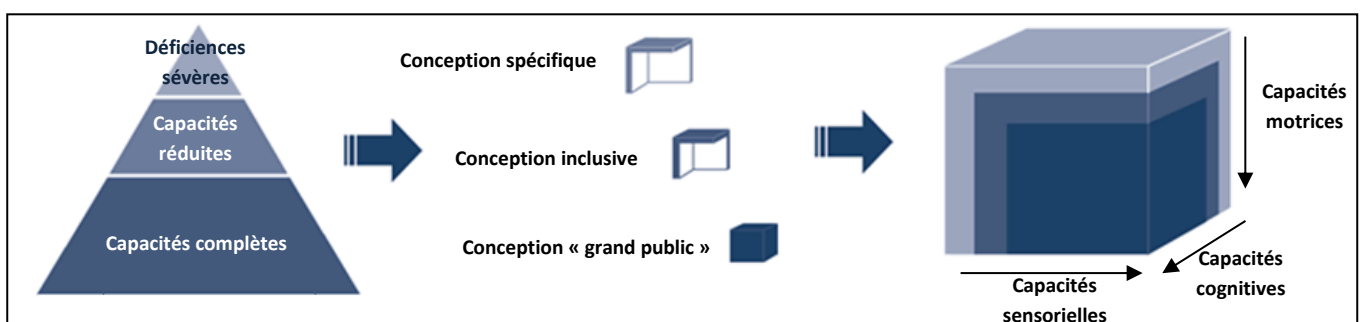


Figure 8-4. Niveaux de conception et degré d'inclusion, en fonction des capacités des utilisateurs. Représentation conjointe et complémentaire de la pyramide de population (Benktzon et al. 1993), et du cube de la conception inclusive (Keates & Clarkson 2004).

Ces trois approches de conception sont liées aux aptitudes des utilisateurs, définies par trois dimensions de capacités. Cette idée est schématiquement représentée par un cube, aussi appelé le "cube de la conception inclusive" (Figure 8-4). Les capacités sensorielles, cognitives et motrices

représentent 3 axes du cube tel que : plus le volume du cube est important, plus le nombre de personnes déficientes, intégrées dans la conception, est grand. Basée sur le modèle de la pyramide, l'objectif de l'approche est d'étendre au mieux le marché « grand public », pour y inclure ceux ayant des déficiences modérées, tout en acceptant que des solutions spécialisées puissent être nécessaires pour satisfaire les besoins de ceux qui sont au sommet de la pyramide.

Nous pensons que cette représentation de la population, en termes de niveaux de capacité, peut soutenir l'intégration des caractéristiques physiques des utilisateurs, dans une démarche structurée. Partant de cette vision, nous proposons d'appliquer notre dispositif dans une **approche de conception proactive**, basée sur la pyramide de la conception inclusive, pour prendre en compte au maximum le spectre de capacité des utilisateurs, dès la base du processus. Nous nous intéressons donc dans un premier temps à une conception visant un public « idéal » (sans déficiences), avant d'étendre la conception pour inclure d'avantage d'utilisateurs ayant des besoins spécifiques.

Capacités complètes (base de la pyramide)

Pour intégrer les capacités de manière structurée en réalité virtuelle, nous nous basons sur **l'exploitation simultanées de notre dispositif de réalité virtuelle, de l'approche présentée chapitre I, et de la vision de conception inclusive.**

L'approche de RV présentée paragraphe 4 est basée sur l'interaction d'un opérateur dans la peau de mannequins virtuels, représentatifs d'utilisateurs ayant des données anthropométriques et physiques différentes. Elle suggère de partir d'une situation initiale où **l'opérateur ne présente pas de déficiences particulières**. Celui-ci, en pleine possession de ses capacités motrices, sensorielles et cognitives, est alors **représentatif des capacités des utilisateurs compris dans la base de la pyramide** (Figure 8-4).

Cette prise en compte intrinsèque des capacités, couplée à la possibilité d'interaction « dans la peau » de mannequins bornes (représentant un pourcentage important de la population en terme d'anthropométrie), permet ainsi aux concepteurs d'explorer l'usage du produit, en couvrant un spectre important de la population en termes dimensionnels et physiques (Figure 8-5).

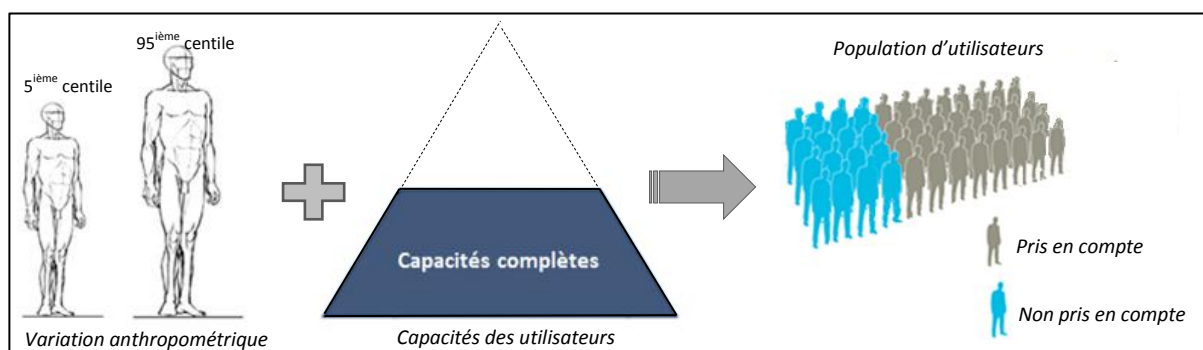


Figure 8-5. Prise en compte de la variabilité anthropométrique et des capacités complètes pour intégrer un grand nombre d'utilisateur dans le processus de conception.

Les caractéristiques des utilisateurs peuvent alors être reliées aux caractéristiques ergonomiques du produit, sous deux angles : 1) l'adéquation entre les fonctions du produit et les capacités des

utilisateurs, et 2) l'adéquation des dimensions du produit avec les caractéristiques anthropométriques des utilisateurs. La conception correspond alors à une cible de produit « grand public » (Figure 8-4).

Capacités réduites et déficiences (extension de la prise en compte)

La diversité humaine est telle qu'il n'est pas réellement possible d'intégrer chacun des cas spécifiques de déficiences dans le processus de conception. Comme défini précédemment, les concepteurs peuvent alors se concentrer en premier lieu sur les personnes présentant une diminution modérée de capacité. Cela permet d'élargir considérablement le spectre des utilisateurs pris en compte lors de la conception. En effet, les utilisateurs potentiels, présentant un niveau de déficiences (toutes capacités confondues) allant de faible à modéré, modélisent un pourcentage important de la population (Grundy et al. 1999; Keates & Clarkson 2004). L'exploration du produit et de son usage, dans la peau de mannequins représentatifs d'utilisateurs ayant des capacités réduites, permet aux concepteurs d'étendre le spectre d'utilisateurs pris en compte dans le processus (Figure 8-6).

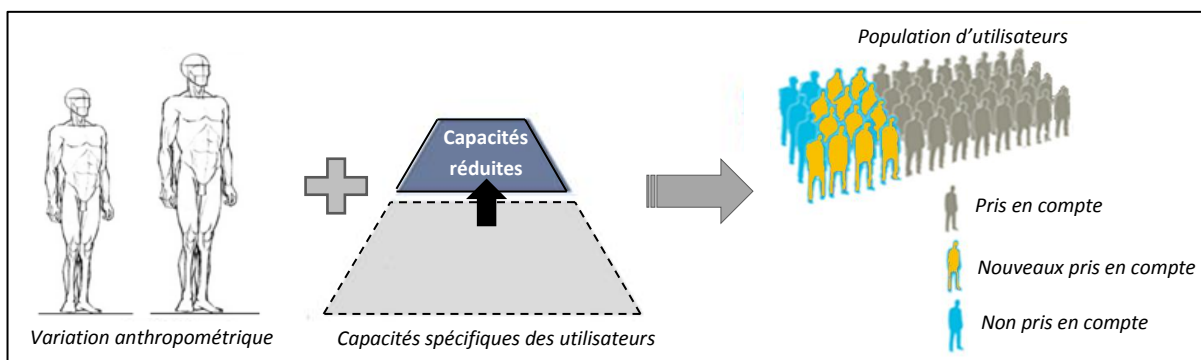


Figure 8-6. Prise en compte de la variabilité anthropométrique et des capacités modérées pour intégrer encore plus d'utilisateur dans le processus de conception.

Une telle approche peut ainsi permettre de considérer au mieux, et de manière structurée, le large spectre d'utilisateurs que figure une conception inclusive. Cependant, la question reste de savoir comment **intégrer de manière quantifiée ces capacités spécifiques dans le processus de conception**. Comme présenté partie 8.1.2, les capacités de raisonnement et d'analyse étant propres à l'opérateur immergé, l'intégration des capacités spécifiques n'est ici applicable que pour des déficiences motrices et sensorielles, mais non cognitives (Figure 8-3).

Concernant les capacités motrices, celles-ci peuvent être délimitées à partir de l'approche définie par l'ICIDH, comme présenté partie 6.6.2. Cette approche définit les limites articulaires des mouvements du corps par niveaux de déficiences, allant de faible à sévère, et se traduisant par un pourcentage de diminution de capacité. Ainsi, les capacités spécifiques peuvent être traduites de manière quantifiée, et intégrées directement dans la simulation (voir chapitre III), permettant d'explorer l'usage futur du produit pour des utilisateurs ayant des capacités modérées.

Il reste cependant nécessaire de **déterminer les capacités motrices spécifiques à prendre en compte**. Pour cela, il convient de préciser le contexte d'utilisation, c'est-à-dire à définir

l'environnement dans lequel le produit sera utilisé, ainsi que les *scenarii* d'utilisations associées. Cette étape permet **d'évaluer les exigences requises en termes de capacités pour l'usage du futur produit**, en fonction du contexte d'utilisation. Dans ce cadre, les outils d'analyses présentés paragraphe 7.4 peuvent être utilisés pour identifier les déficiences motrices principalement impliquées dans l'activité de l'utilisateur. Celles-ci sont ainsi intégrées en priorité dans le processus, offrant aux concepteurs la possibilité d'explorer le produit et son usage, à partir des capacités motrices modérées représentatives.

Cette prise en compte structurée de la variabilité anthropométrique et des capacités motrices spécifiques, suivant une démarche proactive inspirée de l'approche de conception inclusive, représente une approche soutenant la considération d'un grand nombre d'utilisateurs, au plus tôt du processus de conception.

8.3 Discussion

Comme présenté Figure 8-4, le dispositif de réalité virtuelle peut être utilisé pour modéliser des diminutions de capacités motrices, mais également de capacités sensorielles (déficiences visuelles). Simulées de façon simultanée et couplées entre elles, ces différentes capacités (motrices et sensorielles) peuvent alors permettre de représenter un nombre important de profils utilisateurs. Partant de ce constat, nous pensons qu'en plus d'une approche basée sur les niveaux de capacités, le spectre des capacités devrait être structuré pour virtuellement définir des profils d'utilisateurs « types ».

Cette démarche est schématiquement représentée Figure 8-7. Les capacités intrinsèquement prises en compte par l'opérateur en immersion sont symbolisées par les cercles fléchés. Celles non prises en compte sont représentées par les points exclus des cercles fléchés.

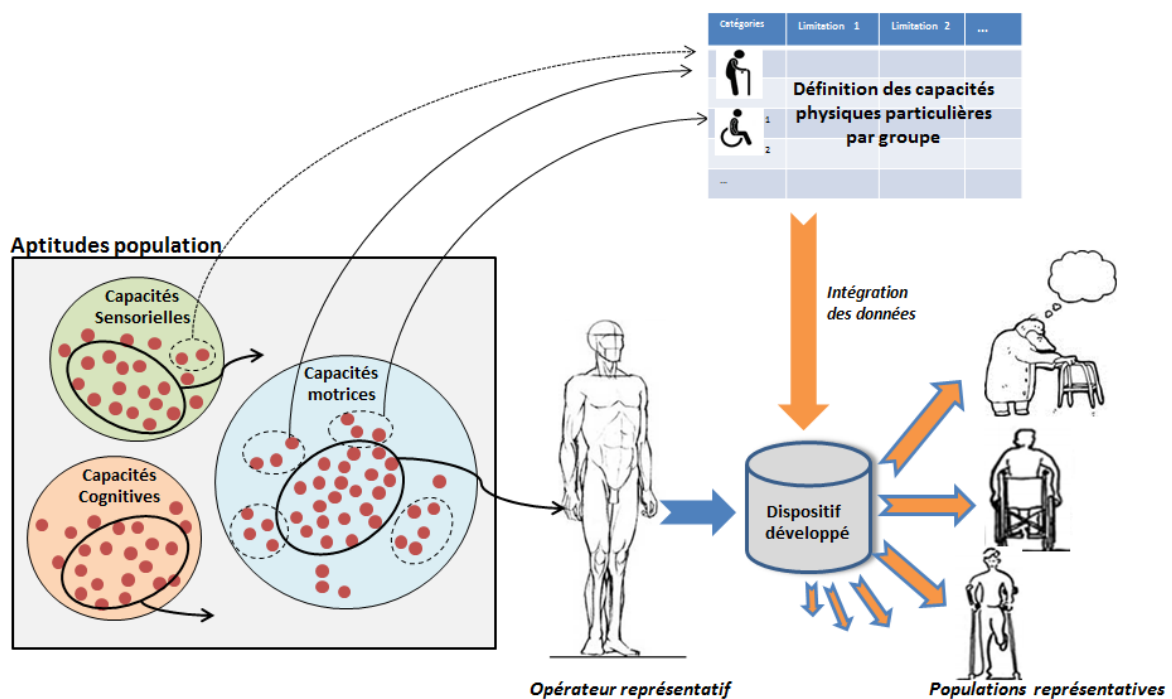


Figure 8-7. Approche méthodologique en conception inclusive. Définition du spectre des capacités en groupes représentatifs.

Le dispositif permet « d'atteindre » certaines de ces capacités spécifiques, au travers des outils développés, et de la simulation en réalité virtuelle. Ces données sont structurées entre elles pour définir des profils d'utilisateurs en termes d'aptitudes motrices et sensorielles. Une telle structuration permettrait aux concepteurs d'explorer virtuellement le couple produit/usage, dans la peau de mannequins morphologiquement et fonctionnellement représentatifs de groupes d'utilisateurs « types ».

A titre d'exemple, le dispositif permet aux concepteurs de simuler l'activité d'un utilisateur présentant une diminution de capacité motrice, ainsi qu'une déficience visuelle (dégénérescence maculaire liée à l'âge). Une telle combinaison de déficiences permet d'évaluer le produit et son usage pour un profil proche de celle d'une « personne âgée ».

Cependant, comme pour les tests utilisateurs classiques en situation réelle, il est difficile d'identifier dans quelle mesure les profils choisis couvrent le spectre des utilisateurs cibles. Ceux-ci sont représentatifs de cas particuliers au sein de la population étudiée. Par analogie aux données anthropométriques, ils correspondent à des données distribuées définies aléatoirement au sein d'un intervalle.

Pour optimiser la prise en compte des capacités à partir d'un nombre limité de profils, il serait donc nécessaire de pouvoir définir les données spécifiques à intégrer. Ces données devraient permettre de borner le spectre des capacités, comme par analogie avec les mannequins bornes (1^{er} et 99^{ième} centiles) en anthropométrie. Une telle approche implique un changement de point de vue, passant d'une répartition statistique de données dimensionnelles, à une représentation pour des données physiques et cognitives. Il reste cependant difficile de définir ces données, dues à la nature multivariable des "aptitudes physiques". En effet, les caractéristiques anthropométriques sont des données dimensionnelles mesurables, et la variation des données anthropométriques d'une population peut souvent être approchée par une distribution normale. Or la diversité et les combinaisons des capacités sensorielles, cognitives, et motrices sont telles qu'il est difficile de définir une approche statistique aussi précise.

8.4 Conclusion

La prise en compte de la variabilité humaine dans le processus de conception est donc un point clé, encore difficile à mettre en œuvre de manière systématique dans une démarche universelle ; que cela soit par des approches expérimentales classiques (tests réels), ou des simulations virtuelles et numériques. Bien que les approches existantes préconisent la participation des utilisateurs lors de tests réels, toute l'étendue des caractéristiques de la population ne peut être représentée à l'aide d'un échantillon de sujets test. Il reste ainsi problématique de quantifier dans quelles mesures ces sujets englobent le spectre des utilisateurs finaux, en termes d'anthropométrie et de capacité. L'intégration structurée et quantifiée des données liées aux capacités des utilisateurs pourrait permettre d'optimiser cette prise en compte de la variabilité humaine. Pour cela, des modèles devraient être définis, permettant de définir des profils utilisateurs représentatifs, couvrant au mieux le spectre de la population, en termes de capacité et d'anthropométrie.

Que ce soit d'un point de vue quantitatif ou qualitatif, le dispositif permet de soutenir une démarche inclusive. Il fournit aux concepteurs des moyens de simuler l'usage futur du produit, pour une large gamme de caractéristiques anthropométriques et de capacités physiques. **En suivant une approche proactive, prenant en compte en priorité les utilisateurs présentant des déficiences faibles à modérées, le nombre de personnes incluses dans le processus de conception peut être optimisé.** La simulation immersive, en construisant une situation dans laquelle les activités réalisées par les concepteurs sont les plus proches possible de la situation future, permet aussi de **réexaminer le problème de conception**, dès les phases amont du processus. Le dispositif **aide ainsi à l'exploration et la proposition de solutions nouvelles**, là où les méthodes classiques ne sont pas toujours pertinentes. Il aide également les concepteurs à mieux s'identifier aux utilisateurs et aux situations de handicaps rencontrées, ce qui est essentiel dans une démarche de conception pour tous.

Notre approche est ici basée sur les capacités motrices et sensorielles des utilisateurs. Des tests et observations en situations réelles, impliquant des personnes ayant des capacités spécifiques, permettrait à la fois d'enrichir les simulations préliminaires effectuées, et d'intégrer les aspects cognitifs non simulés. Les simulations en réalité virtuelle fournies par le dispositif offrent ainsi un support complémentaire aux approches existantes, permettant une exploration et une évaluation du problème, au plus tôt du processus de conception *pour tous*.

Conclusion et perspectives

La reconnaissance des personnes en situation de handicap ou physiquement altérées en tant que citoyen égal à tous est un enjeu majeur de notre société. Pour cela, favoriser leur accès aux activités qu'elles soient sociales, éducatives, professionnelles ou simplement de la vie de tous les jours devient un objectif de conception. C'est l'ambition de la conception universelle, thématique majeure de ce travail de doctorat. Notre premier constat a été que le frein majeur à une conception pour tous est la méconnaissance des difficultés ressenties par les usagers. L'idéal serait d'avoir un retour en temps réel de toutes les personnes concernées par ces difficultés. En même temps, on connaît les difficultés et la lourdeur en termes d'organisation et d'épreuves des tests avec un panel réel. Nous avons donc opté pour des outils de simulation. Nos travaux de thèse ont permis de montrer l'intérêt de la réalité virtuelle pour l'intégration du facteur humain dans le processus de conception, et plus spécifiquement pour la prise en compte des utilisateurs ayant des besoins spécifiques. Dans un premier temps, nous avons étudié les travaux scientifiques et industriels existants dans le domaine de la conception centrée-utilisateur et universelle. Nous nous sommes notamment concentrés sur l'utilisation des simulations numériques et de la réalité virtuelle, et avons mis en avant les apports et principales limitations de ces approches. Nous avons proposé une approche fondée sur l'utilisation conjointe des mannequins numériques et de la réalité virtuelle, l'objectif étant d'améliorer la place du concepteur en tant qu'acteur représentatif des caractéristiques physiques et comportementales des utilisateurs finaux. Pour cela, il nous a paru essentiel de faire pratiquer le concepteur et non simplement lui laisser le rôle d'observateur. Notre processus est donc basé sur des évaluations virtuelles au travers d'un système «Homme réel, Homme virtuel, Produit virtuel, Environnement virtuel ».

Nous avons réalisé une étude préliminaire concernant l'ergonomie d'une tâche d'atteinte (accessibilité d'un environnement). Les résultats ont permis de souligner l'intérêt de l'utilisation d'interfaces de réalité virtuelle dans la modélisation de l'activité des utilisateurs. Le pilotage avec la capture de mouvement, action interactive et intuitive, a permis une prise en compte par le concepteur lui-même des mouvements induits par la tâche. Les volumes dans lesquels évolue le mannequin ont ainsi pu être modélisés de manière plus réaliste, optimisant ainsi l'analyse des zones d'atteinte. L'interactivité offerte par les outils de RV permet de représenter de façon réaliste les comportements futurs de l'utilisateur (comportements pouvant dans certains cas être difficiles à modéliser par le biais de mannequins numériques seuls). Au travers de l'approche proposée, les concepteurs sont ainsi en mesure d'évaluer le concept virtuel de manière interactive, en représentant des utilisateurs avec des caractéristiques anthropométriques différentes, sans avoir besoin de faire physiquement appel aux utilisateurs finaux. Les produits à concevoir sont ainsi testés "physiquement", dès les phases amont du processus de conception, avec des comportements réalistes. L'application de cette approche, réalisée en complément des simulations numériques

"classiques", soutient ainsi les concepteurs dans l'évaluation de l'ensemble des activités réalisées lors de l'usage du produit.

Cette étude a également permis de mettre en avant certains points technologiques et méthodologiques à améliorer, dans une optique de conception *pour tous*. Nous avons notamment soulevé plusieurs limitations liées à l'utilisation de mannequins numériques et d'outils CAD « classiques » (difficultés de modélisation de mannequins avec des caractéristiques spécifiques, limitation de couplage avec des interfaces de réalité virtuelle...).

Pour répondre à ces limitations, nous avons développé un dispositif de réalité virtuelle spécifique, au travers d'une approche originale basée sur l'exploitation d'un moteur de rendu 3D temps réel. Nous avons ainsi pu définir un système de simulation interactif et immersif, permettant la prise en compte des caractéristiques spécifiques des utilisateurs, au plus tôt du processus de conception. Les concepteurs peuvent ainsi comprendre, ressentir, et expérimenter l'activité du sujet, en évoluant virtuellement "dans la peau" de l'utilisateur (défini par un mannequin numérique paramétrable). Des indicateurs ergonomiques (liés à la fois à des normes biomécaniques prédéfinies et aux capacités fonctionnelles spécifiques des utilisateurs) permettent d'analyser de manière objective l'activité simulée. Une interface permet de faciliter l'intégration de ces données et de définir en temps réel les caractéristiques physiques (dimensionnelles, motrices et sensorielles) spécifiques des utilisateurs finaux.

Au travers d'une application expérimentale de nos travaux, nous avons montré que le dispositif de réalité virtuelle constituait un système d'évaluation collaborative, permettant de mutualiser les compétences interdisciplinaires et visions des différents experts métier. La complémentarité des points de vue proposés aide à l'identification des contraintes et potentiels problèmes de conception. Ceci est complété par la vision en temps réel des déficiences, permettant de simuler et d'anticiper les stratégies de compensations mises en œuvre par les personnes en situation de handicap (limitations d'activités et déficiences visuelles). L'activité de l'utilisateur peut ainsi être construite, simulée, et évaluée, de la manière la plus proche possible de la situation d'usage future (même pour des produits n'existant pas encore). Les outils d'analyses enrichissent ces données. Ils fournissent une aide pour analyser l'impact d'un changement de capacité physique sur l'usage du produit, et donc d'anticiper les sources potentielles d'exclusions.

La modification en temps réel du prototype permet une transition quasiment instantanée entre la définition initiale de l'idée de conception et le développement du prototype. Ainsi, les concepteurs peuvent rapidement représenter, tester, puis valider ou infirmer les recommandations et solutions de conception proposées. Le dispositif permet également de structurer l'intégration du facteur humain et donc d'explorer le produit et son usage, tout en couvrant au mieux le spectre des capacités et caractéristiques physiques de la population cible. Ces caractéristiques permettent ainsi de soutenir les concepteurs durant les différentes phases et activités de conception de produits inclusifs (phases d'exploration, de création, et d'évaluation).

D'un point de vue global, le dispositif et les approches proposées constituent donc un système d'évaluation permettant : (1) la considération d'un large spectre de données liées à la population cible, (2) l'utilisation de ces données pour définir les caractéristiques du produit, (3) la vérification des choix de conception par les utilisateurs (modélisés virtuellement), et (4) l'exploitation et la réintégration des données fournies par ces tests dans le processus de conception. Ces différentes

phases constituent la « boucle de connaissance » définie par Keates & Clarkson (2004), permettant de structurer et d'optimiser le développement de solutions plus inclusives. Nos travaux contribuent dans ce sens à soutenir la conception de produits pour tous, en favorisant ce cycle d'activités et de transfert d'informations autour du dispositif de réalité virtuelle. Les évaluations et analyses virtuelles permettent ainsi de compléter les données fournies par le biais des approches existantes et de l'implication active d'utilisateurs réels (entretiens, tests physiques, etc.). En enrichissant le degré d'informations dès les phases amont de la conception, le dispositif fournit un moyen d'améliorer le processus de prise de décision mis en jeu lors de la conception. Le développement des préconcepts peut ainsi être optimisé et le nombre de tests sur maquettes physiques diminués. Pour l'entreprise, ceci se traduit finalement par la mise sur le marché d'un produit adapté aux utilisateurs finaux, avec un coût de conception réduit.

La suite logique de ce travail est d'étudier l'implantation des outils développés dans un contexte industriel réel. Cette intégration de la réalité virtuelle dans le processus de conception impliquerait d'analyser l'utilisation collaborative des outils de CAO déjà implantés dans l'entreprise (Catia, solidworks, etc.), avec des outils plus spécifiques utilisés en réalité virtuelle. En effet, un transfert limpide des données du produit numérique tout au long du processus de conception est essentiel pour séduire les industriels. Ainsi, un travail sur les interfaces et les interactions homme-machine est à préciser, pour favoriser l'utilisabilité des applications immersives. Ainsi, les outils de simulation (réalité virtuelle, simulations numériques, interfaces physiques, etc.), et les outils statistiques pourraient être appliqués de manière collaborative, soutenant au mieux les concepteurs tout au long du processus de conception de produits universels.

Les travaux réalisés dans cette thèse sont basés sur la modélisation des caractéristiques physiques et comportementales des sujets. Quelques remarques peuvent être formulées concernant la fidélité du modèle à la réalité.

Premièrement, le comportement simulé du sujet (représenté par le mannequin virtuel) reste intrinsèquement lié à la cinématique et dynamique de l'opérateur effectuant les tests. On ne peut donc pas s'affranchir des variabilités interindividuelles et intraindividuelles (état émotionnel, fatigue, etc.). Dans ce cadre, une perspective de recherche serait d'étudier les similarités et différences obtenues entre des évaluations réalisées : (1) par simulation en RV, (2) par des utilisateurs en situation réelle et (3) par des utilisateurs en milieu expérimental contrôlé (modélisation physique de l'environnement quotidien). En effet, les contextes d'interactions définis par ces trois approches engendrent des implications psychologiques différentes de la part des participants. De plus, les dispositifs et méthodes employés par les concepteurs (ergonomes, experts, etc.) pour analyser le produit et son usage, sont de natures différentes.

A plus long terme, nous pouvons imaginer que les évaluations par réalité virtuelle soient directement réalisées par l'utilisateur final : celui-ci teste virtuellement le produit et son usage, fournit un cahier des charges adapté, évitant la construction de prototypes physiques. Ainsi, il serait également nécessaire d'analyser la complémentarité entre des évaluations virtuelles réalisées par les concepteurs, et celles réalisées par l'utilisateur lui-même. Cette analyse serait particulièrement

intéressante dans le cas d'une conception universelle, où les interfaces de réalité virtuelle devraient pouvoir s'adapter à la grande spécificité de handicaps et déficiences pouvant être rencontrés chez les utilisateurs. Restons conscients du coût financier des technologies de réalité virtuelle. Pour une démocratisation d'un dispositif, du matériel moins performant mais plus accessible est à étudier (caméras de types Kinect, smartphones...). Le niveau de précision et les possibilités d'analyse seraient bien inférieures à des systèmes de types marqueurs optiques mais ce type de technologie serait donc également accessible pour des structures plus « modestes » de type PME, magasin ou même particulier.

Deuxièmement, bien que le dispositif permette une simulation des déficiences physiques des utilisateurs, il reste difficile de quantifier et modéliser de manière stricte la multiplicité des handicaps existants, ainsi que leurs impacts sur le comportement des sujets. Ainsi, une perspective de recherche plus globale serait de développer des modèles permettant de représenter plus précisément les difficultés rencontrées par les utilisateurs, comme les limites motrices des sujets, en fonction de leur âge, leurs pathologies, leur état de santé général, etc. Ces recherches doivent être menées en collaboration avec des équipes médicales étudiant notamment l'évolution des difficultés et la rééducation qui peut y être associée.

Troisièmement, si la prise en compte des données physiques semble nettement améliorée, les caractéristiques cognitives ne sont pas étudiées dans ce dispositif. Ces handicaps psychique ou mentaux sont extrêmement difficiles (voir actuellement impossible) à simuler (virtuellement ou non) et modéliser de manière quantifiée. Comme la précédente remarque, une collaboration médicale est essentielle à amorcer, même si l'on mesure ici la difficulté de cette étude, et le long terme des résultats.

Dans nos travaux de recherche, nous nous sommes concentrés sur l'étude de systèmes et produits impliquant de grands mouvements et/ou déplacements du corps, liés à des tâches d'atteintes, de manutentions, etc. Les caractéristiques fournies par le dispositif de réalité virtuelle développé pourraient cependant permettre l'étude de nombreux cas d'applications différents. Les possibilités de déplacement, de vision à la 1^{ère} personne, ou encore de simulation de déficiences pourraient permettre d'étudier et de concevoir l'aménagement intérieur d'un hôpital. Ce cas de figure représente en effet un problème de conception devant répondre aux caractéristiques et besoins de nombreuses personnes différentes (personnel de soin, patients hospitalisés, visiteurs, etc.). Dans cette optique, nous pensons que le dispositif devrait également pouvoir être adapté en fonction du problème de conception étudié. Pour des cas d'étude où la manipulation représente une variable importante à étudier par exemple, des interfaces comportementales complémentaires (gants, tracking, etc.) intégrées au dispositif permettraient une simulation des caractéristiques de préhension. Pour des dispositifs numériques, les affichages pourraient s'adapter à l'utilisateur, dans un contexte où les termes d'e-santé se démocratisent comme dernièrement au CES de Las Vegas 2016. C'est un sujet majeur dans un environnement nantais où la création d'un nouveau complexe hospitalier sollicite des réponses à ces interrogations pour assurer les soins pour tous, dans les meilleures conditions, l'acceptabilité et la tolérance face aux différences.

Bibliographie

- Abdel-Malek, K. et al., 2007. Development of the Virtual-Human Santos. In *Digital Human Modeling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 490–499.
- Abdel-Malek, K. et al., 2001. Towards understanding the workspace of the upper extremities. *SAE Technical Paper*.
- Abdel-Malek, K. & Arora, J., 2009. Physics-based digital human modeling: predictive dynamics. *Handbook of Digital Human Modeling*.
- Afacan, Y. & Demirkan, H., 2010. A priority-based approach for satisfying the diverse users' needs, capabilities and expectations: a universal kitchen design case. *Journal of Engineering Design*, 21(2-3), pp.315–343.
- Aptel, M. et al., 2000. OREGÉ: un outil simple d'évaluation des facteurs de risque biomécaniques de TMS du membre supérieur.
- Arnaldi, B., Fuchs, P. & Tisseau, J., 2003. Traité de la réalité virtuelle, volume 1, Introduction à la réalité virtuelle. *Presses de l'École des Mines de Paris*, pp.3–21.
- Ates, H.C., Fiannaca, A. & Folmer, E., 2015. Immersive simulation of visual impairments using a wearable see-through display. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. pp. 225–228.
- Badler, N., 1997. Virtual humans for animation, ergonomics and simulation. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Non-Rigid and Articulated Motion*. Puerto Rico.
- Baeulme, T., Bazzaro, F. & Sagot, J.C., 2010a. Accessibilité des établissements de soin, éléments pour la prise en compte des situations de handicap. *17ème Colloque international des Sciences de la Conception et de l'Innovation*.
- Baeulme, T., Bazzaro, F. & Sagot, J.C., 2010b. Disability, Building and Virtual reality. In *Virtual Reality International Conference*. Laval.
- Bao, Js. et al., 2002. Immersive virtual product development. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1), pp.592–596.
- Bazzaro, F., Charrier, M. & Sagot, J.-C., 2012. Design et ergonomie: facteurs d'innovation dans la conception. *47ème Congrès International de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF)*, p.7.
- Beagley, N., 1997. *Human Body Modeling as a Human Factors Engineering Tool*, Orlando, USA.
- Béguin, P., 2004. L'ergonome, acteur de la conception. *Ergonomie*, pp.375–390.
- Bellemare, M. et al., 2001. L'amélioration des situations de travail par l'ergonomie participative et la formation. *Relations industrielles/Industrial relations*, pp.470–490.

- Benktzon, M. et al., 1993. Designing for our future selves: the Swedish experience. *Applied ergonomics*, 24(1), pp.19–27.
- Bennes, L., 2013. *Vers une méthodologie de développement d'outils de réalité virtuelle pour faciliter la convergence métiers en conception de produits centrée sur l'homme*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 336p.
- Blanchonette, 2009. *Jack Human Modelling Tool: A Review*, Air Operations Division Defence Science and Technology Organisation, Australia.
- Bocquet, J.-C., 1998. Ingénierie simultanée, conception intégrée. *Conception de produits mécaniques--Méthodes, modèles et outils*, Michel TOLLENAERE (Dir.), Editions Hermès, Paris.
- Bodker, S., 1989. A human activity approach to user interfaces. *Human-Computer Interaction*, 4(3), pp.171–195.
- Boujut, J.-F. & Blanco, E., 2003. Intermediary objects as a means to foster co-operation in engineering design. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12(2), pp.205–219.
- Boujut, J.-F. & Laureillard, P., 2002. A co-operation framework for product--process integration in engineering design. *Design studies*, 23(6), pp.497–513.
- Bouvier, G., 2009. L'approche du handicap par les limitations fonctionnelles et la restriction globale d'activité chez les adultes de 20 à 59 ans. *France, portrait social édition*.
- Bouyer, G., 2007. *Rendu multimodal en Réalité Virtuelle: Supervision des interactions au service de la tâche*. Université Paris Sud-Paris XI.
- Brandt, E., 2007. How Tangible Mock-Ups Support Design Collaboration. *Knowledge, Technology & Policy*, 20(3), pp.179–192.
- Brangier, E. & Barcenilla, J., 2003. Concevoir un produit facile à utiliser. *Paris: Editions d'organisation*.
- Brauer, S. & Burns, Y., 1999. Lateral reach: a clinical measure of medio-lateral postural stability. *Physiotherapy Research International*, 4, pp.81–88.
- Brocas, S., 1997. L'ingénierie centrée sur l'homme. *Cahier Industries*, (24), pp.11–20.
- Bullinger, H.J., Breining, R. & Bauer, W., 1999. Virtual prototyping--state of the art in product design. In *26th international conference on computers & industrial engineering*. pp. 103–107.
- Buoguila, L., Ishii, M. & Sato, M., 2001. Scaleable spidar: a haptic interface for human-scale virtual environments. In *Haptic Human-Computer Interaction*. Springer, pp. 182–193.
- Burdea, G. & Coiffet, P., 1993. *La réalité virtuelle*, Hermes.
- Burkhardt, J.-M., 2007. Immersion, représentation et coopération: discussion et perspectives de recherches empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica*, 45(1), pp.59–87.
- Burkhardt, J.-M., 2003. *Réalité virtuelle et ergonomie: quelques apports réciproques*, Presses Universitaires de France.
- Card, S.K., Moran, T.P. & Newell, A., 1980. The keystroke-level model for user performance

-
- time with interactive systems. *Communications of the ACM*, 23(7), pp.396–410.
- Cardoso, C. & Clarkson, P.J., 2012. Simulation in user-centred design: helping designers to empathise with atypical users. *Journal of Engineering Design*, 23(1), pp.1–22.
- Case, K., Porter, J.M. & Bonney, M.C., 1990. SAMMIE: a man and workplace modelling system. *Computer aided ergonomics*, pp.31–56.
- Case, K., Porter, M. & Gyi, D., 2001. Virtual fitting trials in “Design for all.” *Journal of Materials Processing Technology*, 117, pp.255–261.
- Chaffin, D., 2007. Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics*, 48(5), pp.478–491.
- Chaffin, D., 1999. Simulating reach motions. In *Proceedings of SAE Human Modeling for Design and Engineering Conference*, SAE Technical Paper.
- Chaffin, D.B., 2001. Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design. *Society of Automotive Engineers, INC, Warrendale, PA, USA*.
- Chaffin, D.B., 2005. Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics*, 48(5), pp.478–491.
- Chaffin, D.B., 2002. On Simulating Human Reach Motions for Ergonomics Analyses. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 12(3), pp.235–247.
- Chang, S.-W. & Wang, M.-J.J., 2007. Digital human modeling and workplace evaluation: Using an automobile assembly task as an example. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 17(5), pp.445–455.
- Chedmail, P., Maille, B. & Ramstein, E., 2001. État de l’art sur l’accessibilité en réalité virtuelle, application à l’étude de l’ergonomie. In *Colloque Pimeca, La Plagne, 2-5 avril*.
- Chedmail, P., Maille, B. & Ramstein, E., 2002. État de l’art sur l’accessibilité et l’étude de l’ergonomie en réalité virtuelle. *Mécanique & industries*, 3(2), pp.147–152.
- Chitescu, C., Sagot, J.-C. & Gomes, S., 2003. Favoriser l’articulation “ergonomieconception de produits” à l’aide de mannequins numériques. In *les actes de la conférence 10ème Séminaire CONFERE (Collège d’Études et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l’Innovation et la Conception, Belfort, France*. pp. 3–4.
- Chitescu, L.C., 2005. *Simulation en ergonomie: facteur d’innovation dans la conception de produits: application à la conception de systèmes de travail*. Institut national polytechnique de Lorraine.
- Christou, C. & Parker, A., 1995. Visual realism and virtual reality: a psychological perspective. *Simulated and Virtual Realities*. Taylor and Francis, London, pp.53–80.
- Chryssolouris, G. et al., 2000. A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(4), pp.267–276.
- Clarkson, P.J. et al., 2007. *Inclusive design toolkit*, Engineering Design Centre, University of Cambridge, UK.
- Clarkson, P.J. et al., 2013. *Inclusive design: design for the whole population*, Springer Science

& Business Media.

- Clarkson, P.J. & Coleman, R., 2015. History of Inclusive Design in the UK. *Applied Ergonomics*, 46, pp.235–247.
- Conte, M., 2004. La conception pour tous: une approche encore écartée en France. *Proceedings of 17èmes Entretiens de l'Institut Garches*, pp.23–28.
- Daily, M. et al., 2000. Distributed design review in virtual environments. In *Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*. pp. 57–63.
- Dainoff, M.J., 2004. *Guidelines for using anthropometric data in product design*, Human Factors and Ergonomics Society.
- Danet, S. & Haury, B., 2011. L'état de santé de la population en France. *Suivi des objectifs annexés à la loi de santé publique*. Paris: DRESS.
- Dang, N.-T. et al., 2008. A framework for design and evaluation of collaborative virtual environments. In *Proceedings of the 3ème Journées de de l'Association Francaise de Réalité Virtuelle*. Bordeaux, France, pp. 119–126.
- Dassault-Systemes, 2000. Using the reach envelope: CatiaV5. Available at: http://catiadoc.free.fr/online/cfyughbr_C2/cfyughbrrchenv.htm.
- Datas, A., 2013. *Analyse et simulation de mouvements d'atteinte contraints en position et orientation pour un humanoïde de synthèse*. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- Delangle, M., Petiot, J.-F. & Poirson, E., 2015a. Assessing the differences between numerical methods and real experiments for the evaluation of reach envelopes of the human body. In *14ème colloque national aip primeca, La Plagne, France*.
- Delangle, M., Petiot, J.-F. & Poirson, E., 2015b. Assessing the differences between numerical methods, CAD evaluations and real experiments for the assesement of reach envelopes of the human body. In *ICED "Design for Life."* Milan, Italy.
- Delangle, M. & Poirson, E., 2013a. Helping the designer to choose his software: Comparative analysis of human modeling tools. In *2nd International Digital Human Modeling Symposium, Ann Arbor, Michigan*.
- Delangle, M. & Poirson, E., 2013b. Helping the designer to choose his software: Comparative analysis of human modeling tools. In *Congrès Français de Mécanique, Bordeaux*.
- Delangle, M., Poirson, E. & Petiot, J.-F., 2014. Study of human accessibility: comparison between physical tests and numerical simulation results. In *Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference, Cavtat, Croatie*.
- Delisle, A. et al., 2002. Etude cinématique de diverses méthodes de manipulation de la souris d'ordinateur. *Rapport R-311*, p.35.
- Demirbilek, O. & Demirkan, H., 2004. Universal product design involving elderly users: a participatory design model. *Applied Ergonomics*, 35(4), pp.361–370.
- Dorta, T., Lesage, A. & Di Bartolo, C., 2012. Collaboration and design education through the interconnected HIS. *Physical Digitality: Proceedings of the eCAADe*, 2, pp.97–105.

-
- Dorta, T., Lesage, A. & Pérez, E., 2009. Design tools and collaborative ideation.
- Duchamp, R., 1988. *La conception de produits nouveaux* Hermès, ed., Paris, 60p.
- Duchamp, R., 1999. *Méthodes de conception de produits nouveaux*, Hermès science publications.
- Dufour, M. & Pillu, M., 2007. *Biomécanique fonctionnelle. Membres - Tête - Tronc* E.d MASSON., Paris.
- Duncan, P. et al., 1990. Functional Reach: A New Clinical Measure of Balance. *Journal of Gerontology: Medical Sciences*, 45(06), pp.192–197.
- Duncan, P. et al., 1992. Functional Reach: Predictive Validity in a Sample of Elderly Male Veterans. *Journal of Gerontology: Medical Sciences*, 47(03), pp.93–98.
- Dupin, M., 2007. Prendre en compte l'utilisateur dans le processus de conception de produits: différentes approches de l'Universal Design. *Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM)-Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI): Paris*, p.13.
- Eberly, D.H., 2006. *3D game engine design: a practical approach to real-time computer graphics*, CRC Press.
- Ellis, S.R., 1991. Nature and origins of virtual environments: A bibliographical essay. *Computing Systems in Engineering*, 2(4), pp.321–347.
- Erlandson, R.F., 2007. *Universal and accessible design for products, services, and processes*, CRC Press.
- Fadier, E., 1997. L'intégration des facteurs humains à la conception. *Phoebus, spécial sur le Facteur Humain*, pp.59–78.
- Falzon, P., 2004. *Ergonomie*, Presses universitaires de France.
- Faulkner, T.W. & Day, R.A., 1970. The maximum functional reach for the female operator. *AIEE Transactions*, 2, pp.126–131.
- Fischer, X. & Troussier, N., 2004. La Réalité Virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur. *Mécanique & industries*, 5(02), pp.147–159.
- Friese, K.-I., Herrlich, M. & Wolter, F.-E., 2008. Using game engines for visualization in scientific applications. In *New Frontiers for Entertainment Computing*. Springer, pp. 11–22.
- Frischer, B., 2011. The Digital Hadrian's Villa Project: Virtual World Technology as an Aid to Finding Alignments between Built and Celestial Features. *CAA 2012*.
- Fuchs, P. et al., 2006. *Le traité de la réalité virtuelle*, Presses des MINES.
- Fuchs, P., 1996. Les interfaces de la réalité virtuelle. *Presse de l'école de Mines de Paris*.
- Fuchs, P. & Moreau, G., 2003. *Le traité de la réalité virtuelle--Volume 1: fondements et interfaces comportementales*, Les presses de l'École des Mines.
- Fuchs, P. & Moreau, G., 2001. Réalité virtuelle - Concepts et outils. In *Techniques de l'Ingénieur*.
- Fuchs, P. & Richir, S., 2006. La méthode I2I: "Interaction et Immersion pour l'Innovation."

- Encyclopédie des Techniques de l'Ingénieur*, pp.TE5910–10.
- Fuchs, P. & Richir, S., 2003. Réalité virtuelle et conception: principes et applications. *Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle*, 1, pp.AG2520–1.
- Garrigou, A. et al., 2001. Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (3-2).
- Gomes, S., 1999. *Contribution de l'analyse de l'activité au processus de conception de produits innovants application à la conception de systèmes de contrôle-commande automobiles*. Thesis, INPL, ENSGSI, Nancy, 221p.
- Gomez Jauregui, D.A. et al., 2014. Toward“ Pseudo-Haptic Avatars”: Modifying the Visual Animation of Self-Avatar Can Simulate the Perception of Weight Lifting. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 20(4), pp.654–661.
- Goncalves, F., 2014. *Conception d'un environnement virtuel avec adaptation de l'immersion pour la simulation de conduite en fauteuil roulant*. Thèse de Doctorat, Laboratoire d'ingénierie des systèmes de Versailles, 144p.
- Goodman, J. et al., 2006. Factors involved in industry's response to inclusive design. In *Designing accessible technology*. Springer, pp. 31–39.
- Gregor, P., Sloan, D. & Newell, A.F., 2005. Disability and technology: building barriers or creating opportunities? *Advances in computers*, 64, pp.283–346.
- Grood, E.S. & Suntay, W.J., 1983. A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee. *Journal of biomechanical engineering*, 105(2), pp.136–144.
- Grosjean, J.C. & Neboit, M., 2000. Ergonomie et prévention en conception des situations de travail. *Cahiers de notes documentaires-Hygiène et sécurité du travail*, 2000, 179, NSD, 2127, pp.31–48.
- Grundy, E. et al., 1999. *Disability in Great Britain: Results from the 1996/97 disability follow-up to the family resources survey*, Great Britain, Department of Social Security.
- Hanavan, J. & Ernest, P., 1964. A mathematical model of the human body. *Aerospace Medical Research Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base*.
- Hanson, L. & Högberg, D., 2008. Digital Human Modeling in Automotive Product Application. In V. G. Duffy, ed. *Handbook of Digital Human Modeling*, pp. 17–40.
- Hanson, L., Högberg, D. & Söderholm, M., 2011. Digital test assembly of truck parts with the IMMA-tool--an illustrative case. *Work (Reading, Mass.)*, 41, pp.2248–2252.
- Heinrichs, W.L., Dev, P. & Davies, D., 2014. Patients Should Not Be Passive! Creating and Managing Active Virtual Patients in Virtual Clinical Environments. In *Games for Health 2014*. Springer, pp. 56–61.
- Hogberg, D., 2009. Digital human modelling for user-centred vehicle design and anthropometric analysis. *International journal of vehicle design*, 51(3-4), pp.306–323.
- ISO, 2010. ISO 9241-210:2010 : Ergonomie de l'interaction homme-système -- Partie 210: Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs.

-
- Jayaram, S. et al., 2001. Assessment of VR Technology and its Applications to Engineering Problems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(1), p.72.
- Jayaram, S. et al., 1999. VADE: a virtual assembly design environment. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 19(6), pp.44–50.
- Jayaram, U. et al., 2006. Introducing quantitative analysis methods into virtual environments for real-time and continuous ergonomic evaluations. *Computers in Industry*, 57(3), pp.283–296.
- Johanson, A. & Astrom, L., 2004. *How to use mannequins and motion capture*. Lulea University of technologie.
- Karhu, O., Kansi, P. & Kuorinka, I., 1977. Correcting working postures in industry: a practical method for analysis. *Applied ergonomics*, 8(4), pp.199–201.
- Keates, S. & Clarkson, J., 2004. *Countering design exclusion*, Springer.
- Kelly, K., Heilbrun, A. & Stacks, B., 1989. Virtual Reality; an Interview with Jaron Lanier. *Whole Earth Review*, 64(108-120), p.2.
- Kennedy, K.K., 1978. Reach Capability of Men and Women: A Three-Dimensional Analysis. *Aerospace Medical Research Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base*.
- Kirisci, P.T. et al., 2012. *Supporting Inclusive Design of Mobile Devices with a Context Model*, INTECH Open Access Publisher.
- Klinger, E., 2008. *Apport de la réalite virtuelle a la prise en charge du handicap*, Ed. Technique Ingénieur.
- Kumar, S., 2013. *Experience-based design review of healthcare facilities using interactive virtual prototypes*. Thèse de doctorat, Architectural Engineering, Pennsylvania State University, 230p.
- Lämkuil, D., Hanson, L. & Örtengren, R., 2009. A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(2), pp.428–441.
- Lämkuil, D., Hanson, L. & Örtengren, R., 2007. The influence of virtual human model appearance on visual ergonomics posture evaluation. *Applied Ergonomics*, 38(6), pp.713–722.
- Landau, K., 2000. *Ergonomics software tools in product and workplace design - A review of recent developments in human modeling and other design aids*, Stuttgart.
- Leborgne, C., 2001. *Proposition d'une démarche anthropocentrée de conception de produits nouveaux basée sur l'usage et destiné à une meilleure intégration, par l'ergonome, des besoins et des attentes des usagers*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech, 240p.
- Lecuyer, A., 2009. Simulating Haptic Feedback Using Vision: a Survey of Research and Applications of "Pseudo-Haptic Feedback." *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(1), pp.39–53.
- Lombard, M. & Ditton, T., 1997. At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), p.0.

- Lonchamp, P., 2004. *Co-évolution et processus de conception intégrée de produits: Modèle et support de l'activité de conception*. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Lorisson, J., 2010. Réalité virtuelle dans l'industrie-Développement des produits et des processus. *Techniques de l'ingénieur TE*, 5, p.965.
- Mace, R.L., Hardie, G.J. & Place, J.P., 1990. *Accessible environments: Toward universal design*, Center for Accessible Housing, North Carolina State University.
- Maguire, M., 2001. Methods to support human-centred design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4), pp.587–634.
- Mahdjoub, M. et al., 2010. A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment. *Computer-Aided Design*, 42(5), pp.402–413.
- Mahdjoub, M., 2007. *La réalité virtuelle pour une conception de systèmes mécaniques centrée sur l'utilisateur*. Thèse de Doctorat, Génie mécanique, UTBM, 180p.
- Marion, N., 2010. *Modélisation de scénarios pédagogiques pour les environnements de réalité virtuelle d'apprentissage humain*. Thèse de Doctorat, Université de Brest, 204p.
- Marshall, R. et al., 2002. A taskbased design for all support tool. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18, pp.297–303.
- Marshall, R. et al., 2010. HADRIAN: a virtual approach to design for all. *Journal of Engineering Design*, 21(2), pp.253–273.
- Marshall, R. et al., 2004. Using HADRIAN for eliciting virtual user feedback in design for all. *Journal of Engineering Manufacture*, 218(9), pp.1203–1210.
- Mathiassen, S.E. et al., 2002. Tools for integrating engineering and ergonomics assessment of time aspects in industrial production. In *Proceedings of the 34th Annual Congress of the Nordic Ergonomics Society*. Kolmården, Sweden, pp. 579–584.
- McAtamney, L. & Corlett, E.N., 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied ergonomics*, 24(2), pp.91–99.
- Mengoni, M. & Germani, M., 2006. Integration of virtual reality technologies in industrial design processes: a structured approach. In *Proceedings of virtual concept*.
- Van Der Meulen, P. & Seidl, A., 2007. Ramsis--the leading cad tool for ergonomic analysis of vehicles. In *Digital Human Modeling*. Springer, pp. 1008–1017.
- Michigan University, 2011. 3D Static Strength Prediction Program™ Version 6.0.5 User's Manual.
- Modzelewski, M. et al., 2012. *Creative Design for Inclusion Using Virtual User Models*. Springer Berlin Heidelberg.
- Monnier, G., Wang, X. & Trasbot, J., 2009. A motion simulation tool for automotive interior design. *Handbook of Digital Human Modeling: Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering*.
- Moreau, G., 2009. *Représentation et construction des systèmes d'information par l'image*.

Thèse de doctorat, Université de Nantes.

- Nelson, J., 2011. *Contribution à l'analyse prospective des usages dans les projets d'innovation*. Arts et Métiers ParisTech.
- Newell, A.F., 1993. Ordinary and extra-ordinary human computer interaction. In *Keynote address at the International Computer Human Interface Conference*. Amsterdam.
- Newell, A.F. et al., 2011. User-sensitive inclusive design. *Universal Access in the Information Society*, 10(3), pp.235–243.
- Newell, A.F. & Gregor, P., 1999. Extra-ordinary human--machine interaction: what can be learned from people with disabilities? *Cognition, Technology & Work*, 1(2), pp.78–85.
- Newell, A.F. & Gregor, P., 2000. "User sensitive inclusive design" in search of a new paradigm. *Proceedings on the 2000 conference on Universal Usability*, pp.39–44.
- NIOSH, 1991. Work practice guide for manual lifting. Technical report n 81-122. *Department of Health and Human service*.
- Norman, D.A., 2013. *The design of everyday things: Revised and expanded edition*, Basic books.
- Occhipinti, E., 1998. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), pp.1290–1311.
- Oliver, R. et al., 2001. A survey of the design needs of older and disabled people. *Contemporary Ergonomics, Proceedings of the Ergonomics Society Annual Conference*, pp.365–370.
- OSHA, U.S., 1999. Department of Labor. *OSHA technical manual. OSHA publication*.
- Ottosson, S., 2002. Virtual reality in the product development process. *Journal of Engineering Design*, 13(2), pp.159–172.
- Palmon, O. et al., 2004. Virtual environments as an aid to the design and evaluation of home and work settings for people with physical disabilities. *Proc. 5th Intl Conf. Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech., Oxford, UK*, pp.119–124.
- Park, W., 2008. Data-based human motion simulation methods. *Handbook of digital human modeling. CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton*, pp.1–9.
- Parvati, D.E. V, Heinrichs, W.L. & Patricia, Y., 2011. CliniSpace: A Multiperson 3D Online Immersive Training Environment Accessible through a Browser. *Medicine Meets Virtual Reality 18: NextMed*, 163, p.173.
- Pasciuto, I. et al., 2011. A hybrid dynamic motion prediction method with collision detection. In *Proceedings of the First International Symposium on Digital Human Modeling*.
- Perrin, J., 2001. Concevoir l'innovation industrielle-Méthodologie de conception de l'innovation. *CNRS Edition, ISBN 2-271-05822-8, Paris*.
- Persad, U. et al., 2007. A framework for analytical inclusive design evaluation. *Guidelines for a Decision Support Method Adapted to NPD Processes*.
- Petiot, J.-F. & Yannou, B., 2004. Measuring consumer perceptions for a better comprehension, specification and assessment of product semantics. *International*

- Journal of Industrial Ergonomics*, 33(6), pp.507–525.
- Petrén, T., 1968. Anatomy textbook: The locomotor system. *Nordiska bokhandels förlag, Stockholm, Sweden*.
- Pimentel, K., Teixeira, K. & Jamet, D., 1994. *La réalité virtuelle...: de l'autre côté du miroir*, Ed. Addison-Wesley.
- Pinto, L.J. & Taneja, N., 2005. Use of digital anthropometric mannequins for human engineering evaluation of workstations in aviation. *Ind J Aerospace Med*, 49(1), pp.15–19.
- Plos, O., Aoussat, A. & Buisine, S., 2011. *Innover pour et par le handicap. Méthodologie de conception de produits adaptée aux marchés de niche: application au marché du handicap moteur*. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- Poirson, E. & Parkinson, M., 2014. Estimated anthropometry for male commercial pilots in Europe and an approach to its use in seat design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(5), pp.769–776.
- Porter, J.M. et al., 2004. Beyond Jack and Jill : designing for individuals using HADRIAN. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33, pp.249–264.
- Preiser, W.F.E., 2008. Universal Design: from policy to assessment research and practice. *Archnet-IJAR, International Journal of Architectural Research*, 2(2), pp.78–93.
- Prensky, M., 2005. Computer games and learning: Digital game-based learning. *Handbook of computer game studies*, 18, pp.97–122.
- Pusch, A., Martin, O. & Coquillart, S., 2009. HEMP. hand-displacement-based pseudo-haptics: A study of a force field application and a behavioural analysis. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(3), pp.256–268.
- Quarante, D., 1994. *Eléments de design industriel*, Polytechnica.
- Ranger, F., 2010. *Evaluation de l'offre anthropométrique pour la conception de produits*. Master thesis, Université du Québec à Montreal.
- Raschke, U., 2004. The Jack human simulation tool. *Working Postures and Movements--tools for evaluation and engineering*. Boca Raton: CRC Press, 200, pp.431–437.
- Rasmussen, J. et al., 2003. Anybody-a software system for ergonomic optimization. In *Fifth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*.
- Reed, M., Parkinson, M. & Chaffin, D., 2003. A New Approach to Modeling Driver Reach. *SAE International*.
- Reuding, T. & Meil, P., 2004. Predictive value of assessing vehicle interior design ergonomics in a virtual environment. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 4(2), pp.109–113.
- Richir, S., 2003. Les technologies de la réalité virtuelle pour la conception de produits. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Angers*.
- Richir S., S. & Fuchs P., P., 2006. La méthode I2I: "Interaction et Immersion pour l'Innovation." *Techniques de l'ingénieur. Télécoms*, (TE5910).

-
- Riva, G., 2005. Virtual reality in psychotherapy: review. *Cyberpsychol Behavior*, 8, pp.220–230.
- De Sa, A.G. & Zachmann, G., 1999. Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, 23(3), pp.389–403.
- Sagot, J.C., 1996. Améliorer simultanément les moyens de production et les conditions de travail : l'ergonomie. *La technique Moderne*, 6-7, pp.7–12.
- Sagot, J.C., 1999. *Ergonomie et conception anthropocentrée*. Document pour l'Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy.
- Sagot, J.-C., Gouin, V. & Gomes, S., 2003. Ergonomics In Product Design: Safety Factor. *Journal Safety Science*, 41(2), pp.137–154.
- Sagot, J.C., Mahdjoub, M. & Gomes, S., 2005. Concevoir la fonction d'usage à travers l'ergonomie. In *Actes du colloque: le design en question(s)*.
- Salmen, J.P., 2001. *US accessibility codes and standards: challenges for universal design*, McGraw-Hill New York, NY.
- Sanchez-Vives, M. V & Slater, M., 2005. From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4), pp.332–339.
- Seidl, A., 1997. RAMSIS: a New CAD-Tool for Ergonomics Analysis of Vehicles Developed for the German Automotive Industry. Automotive Concurrent/ Simultaneous Engineering. In *Society of Automotive Engineering, Special Publications*. pp. 51–57.
- Shaikh, I. et al., 2003. Integration of immersive environment and RULA for real time study of workplace related musculoskeletal disorders in the upper limb. *ASME Proceedings of DETC2003*.
- Shaikh, I. & Jayaram, U., 2004. Participatory ergonomics using VR integrated with analysis tools. *Simulation Conference. Proceedings of the 2004 Winter*, 2, pp.1746–1754.
- Sherman, W.R. & Craig, A.B., 2002. *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*, Elsevier.
- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A., 1994. Depth of presence in virtual environments. *Presence*, 3(2), pp.130–144.
- Slater, M. & Wilbur, S., 1997. A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 6(6), pp.603–616.
- Söderman, M., 2005. Virtual reality in product evaluations with potential customers: An exploratory study comparing virtual reality with conventional product representations. *Journal of engineering design*, 16(3), pp.311–328.
- Sohlberg, M.M. & Mateer, C.A., 1989. *Introduction to cognitive rehabilitation: Theory and practice.*, Guilford Press.
- Sohlenius, G., 1992. Concurrent engineering. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 41(2), pp.645–655.
- Stone, D. et al., 2005. *User interface design and evaluation*, Morgan Kaufmann.

- Story, M.F., 1998. Maximizing usability: the principles of universal design. *Assistive technology*, 10(1), pp.4–12.
- Story, M.F., Mueller, J.L. & Mace, R.L., 1998. *The Universal Design File: Designing for People of All Ages and Abilities*, Center for Universal Design.
- St-Vincent, M., Toulouse, G. & Bellemare, M., 2000. Démarches d'ergonomie participative pour réduire les risques de troubles musculo-squelettiques: bilan et réflexions. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (2-1).
- Theureau, J. & Pinsky, L., 1984. Paradoxe de l'ergonomie de conception et logiciel informatique. *Revue des conditions de travail*, 9, pp.25–31.
- Thomas, P. & Macredie, R.D., 2002. Introduction to the new usability. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 9(2), pp.69–73.
- Thorvald, P., Högberg, D. & Case, K., 2012. Applying cognitive science to digital human modelling for user centred design. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 3(1), pp.90–106.
- Tilley, A.R., Anning, J. & Welles, R., 2002. *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design. Revised Edition*, Wiley & Sons.
- Triomphe, A., 1999. Les faiblesses du marché des aides techniques. *Réadaptation*, (458), pp.25–26.
- Vanderheiden, G. & Tobias, J., 2000. Universal design of consumer products: current industry practice and perceptions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(32), pp.6–19.
- Vanderheiden, G.C. & Jordan, J.B., 2006. Design for people with functional limitations. *Handbook of Human Factors and Ergonomics, Fourth Edition*, pp.1407–1441.
- Vanneuville, G. et al., 1980. Eléments de biomécanique du rachis. *63ème congrès de l'association des anatomistes*.
- Viganò, G. et al., 2004. Virtual reality as a support tool in the shoe life cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(7), pp.653–660.
- Vignier, N. et al., 2008. Demographics of wheelchair users in France: Results of National community-based handicaps-incapacités-dépendance surveys. *Journal of rehabilitation medicine*, 40(3), pp.231–239.
- Waller, S. et al., 2015. Making the case for inclusive design. *Applied Ergonomics*, 46, pp.297–303.
- Waller, S.D. et al., 2010. Understanding the Co-occurrence of Ability Loss. *Designing Inclusive Interactions - Inclusive Interactions Between People and Products in Their Contexts of Use*.
- Waters, T.R. et al., 1993. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), pp.749–776.
- Whitman, L.E. et al., 2004. Virtual reality: its usefulness for ergonomic analysis. In *Proceedings of the 36th conference on Winter simulation*. pp. 1740–1745.

-
- Wisner, A., 1995. Understanding problem building: ergonomic work analysis. *Ergonomics*, 38(3), pp.595–605.
- Woodson, W.E., Tillman, B. & Tillman, P., 1992. *Human factors design handbook: information and guidelines for the design of systems, facilities, equipment, and products for human use*, Second edition.
- World Health Organisation, 2001. International Classification of Functioning , Disability and Handicaps.
- World Health Organisation, 1980. International classification of impairments, disabilities, and handicaps: a manual of classification relating to the consequences of disease, published in accordance with resolution WHA29. 35 of the Twenty-ninth World Health Assembly, May 1976.
- Wright, P.S., 2014. “*Vision in Product design*” as a method for universal design. Master Thesis, Department of Engineering Design and Materials, Norwegian University of Science and Technology.
- Yan, W., Culp, C. & Graf, R., 2011. Integrating BIM and gaming for real-time interactive architectural visualization. *Automation in Construction*, 20(4), pp.446–458.
- Yang, J. & Abdel-Malek, K., 2009. Human Reach Envelope and Zone Differentiation for Ergonomic Design. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 19(1), pp.15–34.
- Zeltzer, D., 1992. Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), pp.127–132.

ANNEXES

Annexe A : Etude préliminaire

Aider le concepteur dans le choix de logiciel : outil d'aide à la décision et étude comparative de logiciels de modélisation humaine.

1. Introduction

Ces dernières décennies ont vu l'émergence de logiciels commerciaux basé sur des modèles d'humain numérique: l'humain virtuel (Badler 1997). Les outils numériques de modélisation humaine (DHM : Digital Human Modeling) ont été développés dans le milieu industriel pour optimiser le processus de conception de produits (Mathiassen et al. 2002). Ce type d'outils peut en effet contribuer à réaliser des corrections et ajustements plus rapides lors des phases itératives du processus de conception de produits (Chaffin 2001). Avec la croissance de la puissance informatique, l'usage de ces logiciels est devenu incontournable, notamment lorsque la conception doit répondre aux attentes et exigences des utilisateurs finaux (Mahdjoub et al. 2010). Comme dans tout milieu informatique et technologique, la qualité et la précision de ces outils est en constante croissance, permettant de satisfaire au mieux les exigences du milieu industriel et de la recherche (Landau 2000; Chaffin 2005). De nos jours, une multitude d'outils permettant de concevoir des représentations virtuelles des utilisateurs sont développés. Nombreux d'entre eux intègrent une gamme plus ou moins importante de fonctionnalités d'analyses, basées sur des normes et concepts pouvant être différents. La construction même du mannequin peut grandement varier d'un logiciel à l'autre. Ainsi, il devient difficile pour les concepteurs de connaître toutes les caractéristiques intégrées dans les logiciels, et ainsi définir lequel serait le mieux adapté à leurs activités de conception.

Nous proposons ici de développer un outil d'aide à la décision permettant de soutenir les utilisateurs dans leurs choix de logiciel de DHM. Premièrement, nous avons dressé une liste de logiciels à comparer, et défini les critères de comparaison. Ensuite une liste d'indicateurs divisés en trois grandes catégories a été proposée (degré de réalisme, fonctions et environnement). Basés sur l'utilisation des logiciels, des recherches documentaires et l'étude de rapports techniques (Beagley (1997), Seidl (1997) et Blanchonette (2009) par exemple), les différents indicateurs ont été défini textuellement, puis ré-encodé dans un format quinaire pour permettre de réaliser l'analyse comparative. La première partie présente les caractéristiques des outils de modélisations choisis et la méthodologie proposée. La deuxième partie présente les différents indicateurs, ainsi que le remplissage et le codage du tableau comparatif. La dernière traite des résultats et perspectives de l'étude.

2. Comparaison des outils de DHM : méthodologie

Une liste de 32 logiciels de modélisation 3D disponibles sur le marché a été dressée (étape 1, Figure A.1). Une partie de ces outils, définis comme des modélisateurs génériques (logiciels purement artistiques sans véritable approche anthropométrique), n'ont pas été inclus dans la sélection finale.

Par exemple, Rhinoceros est un logiciel de modélisation 3D généralement utilisé dans le design industriel, architectural ou maritime, mais sans approche de modélisation humaine. Celui-ci n'est donc pas inclus dans l'étude. Il en est de même pour d'autres modélisateurs génériques (excepté ceux de design humain) tels que Blender, True SpaceMaya, 3D studio Max, Lightwave, (...), Pro/Engineer. Une liste de logiciel "admissibles" a ainsi été obtenue (étape 2, Figure A.1). Les douze logiciels finalement sélectionnés pour notre étude sont (Figure A.2) **Jack** (Siemens), **Ramsis** (Human Solutions), **HumanCad** (Nexgen Ergonomics), **3DSSPP** (University of Michigan), Poser (Smith Micro), MakeHuman (freeware), **Anybody** (Anybody Technology), **Catia** (Dassault Systèmes), Daz Studio (DAZ 3D Inc), Quidam (N-Sided), **Santos** (University of Iowa), **Sammie** (Sammie CAD Ltd).

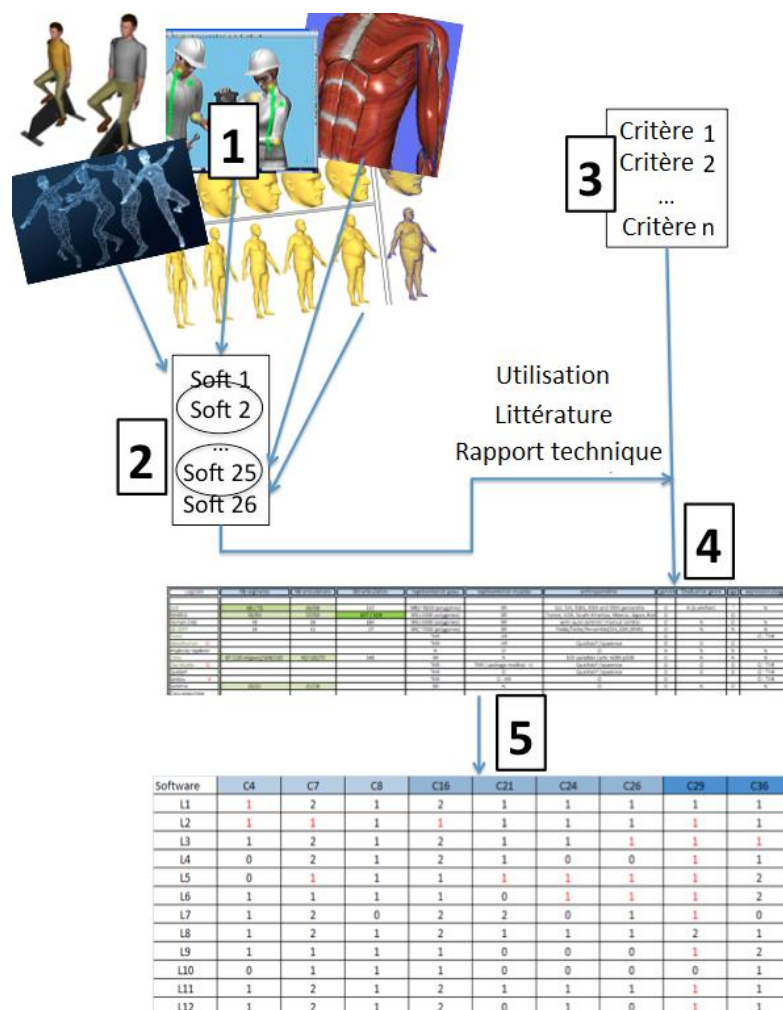


Figure A.1. Méthodologie globale.

Le logiciel **JACK** (Raschke 2004; Blanchonette 2009), a été développé au milieu des années 80 par l'Université de Pennsylvanie, en partenariat avec NASA (actuellement commercialisé par la société Siemens/UGS). **RAMSIS** est un logiciel développé par la société Tecmath et l'Université Technologique de Munich (Seidl 1997; Van Der Meulen & Seidl 2007). Né d'un consortium de constructeurs automobiles à partir de 1987 et aujourd'hui commercialisé par la société Human Solutions, RAMSIS est principalement dédié à la conception d'intérieurs de véhicules et d'avions.

HumanCAD¹² de Nexgen Ergonomics est un logiciel permettant de créer des modèles d'humains numériques dans un environnement en trois dimensions, et de réaliser des analyses ergonomiques pour la conception de produits et de lieux de travail. **3DSSPP** (Michigan University 2011) permet de prédire les exigences de résistance statique pour des tâches telles que soulever, poser, pousser ou tirer. Ce programme fournit une simulation approximative du travail incluant des données posturales, des paramètres de forces (compression au niveau de certaines vertèbres) et d'anthropométrie (male/femelle). **Poser**¹³ est un logiciel développé par la société Smith Micro, permettant la modélisation et la mise en situation de personnages. Les éléments créés et modifiés peuvent être exportés dans d'autres logiciels tels que 3DS, Autodesk Maya, Softimage XSI, Bryce 3D, Cinema 4D et Blender. **MakeHuman**¹⁴ est un logiciel open source, développé en langage Python, permettant de créer des caractères à l'apparence ultra réaliste. **AnyBody** est un système de modélisation et de simulation de la mécanique du corps humain (Rasmussen et al. 2003). L'environnement est défini en termes de forces et de conditions aux limites, et l'utilisateur peut imposer toute sorte de posture et de mouvements. Human Builder est le modèle de mannequin numérique de **Catia/Delmia**¹⁵ (groupe Dassault Système). Ces logiciels fournissent un environnement en 3D et un mannequin permettant la modélisation et la simulation ergonomique de l'interaction entre l'utilisateur et son environnement. **DAZ Studio**¹⁶ est un logiciel développé par DAZ Production (ou DAZ 3D), pour l'art, l'animation 3D, et la création de modèles humains et de rendus visuels. Ce logiciel est disponible gratuitement. De même, **Quidam**¹⁷ est un logiciel pour la création de personnages en 3D, fournissant un support pour la modélisation, l'habillage et la numérisation. **Santos** (Abdel-Malek et al. 2007) est logiciel de modélisation permettant de créer des représentations d'utilisateurs virtuels de manière très réaliste en termes d'apparence, de mouvement, et de rétroaction (évaluation du corps de l'utilisateur virtuel pendant l'exécution de la tâche). Le logiciel offre une vaste gamme d'outils de simulation pour tester la conception des équipements et de l'évaluation des performances de la tâche. **SAMMIE** (System for Aiding Man-Machine Interaction Evaluation) (Porter et al. 2004) a été développé à la fin des années 70 par les Universités de Nottingham et de Loughborough, et est actuellement commercialisé par la société SAMMIE CAD Limited. Il offre une gamme complète d'utilisateurs virtuels humains, pouvant être créés pour simuler des utilisateurs de différents âge, sexe, nationalités, et morphologies.

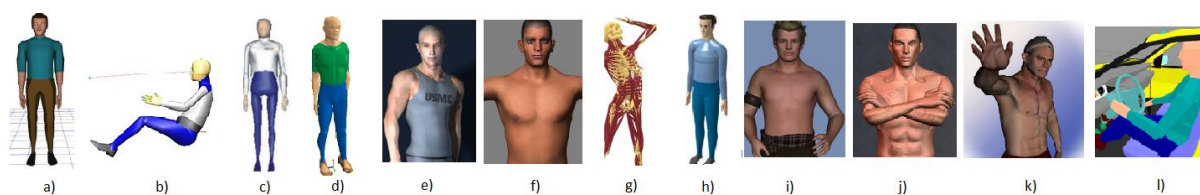


Figure A.2. Mannequin de Jack (a), Ramsis (b), HumanCAD (c), 3DSSPP (d), Poser(e), MakeHuman (f), AnyBody (g), Delmia (h), DAZ Studio(i), Quidam (j), Santos (k) et Sammie (l).

¹² <http://www.nexgenengo.com/ergonomics/humancad2-MQSW.html>

¹³ <http://my.smithmicro.com/poser-3d-animation-software.html>

¹⁴ <http://www.makehuman.org/>

¹⁵ <http://www.3ds.com/products-services/delmia/>

¹⁶ https://www.daz3d.com/get_studio

¹⁷ <http://www.evermotion.org/tutorials/show/7906/quidam-studio-3>

L'étape 3 définie Figure A.1 consiste à rassembler et sélectionner les critères de distinction pour évaluer les différents logiciels présentés ci-dessus. Cette étape est détaillée dans la suite de l'étude.

3. Le tableau de comparaison

3.1 Les critères

La liste d'indicateurs est faite pour réaliser une comparaison objective des logiciels (Tableau A.1). Afin de dresser cette liste, différents sites web, forums, et manuels techniques ont été analysés. Tous les critères mis en place peuvent être divisés en trois catégories:

1. **Degré de réalisme.** Cette catégorie inclut les critères pertinents à l'évaluation du degré de réalisme du logiciel, tels que la fiabilité de la représentation visuelle du modèle, des mouvements, la prise en compte des contraintes physiques, etc.
2. **Fonctions.** Cette catégorie est très importante pour des études ergonomiques et de fatigue. Elle est associée aux fonctions existantes dans le logiciel permettant de réaliser des analyses sur le modèle virtuel (enveloppe d'atteinte, modèle de fatigue, etc.).
3. **Environnement.** Inclut les critères disponibles dans le logiciel permettant la création et la manipulation de l'environnement virtuel.

Tableau A.1. Critères de comparaison divisés en trois catégories.

	Catégorie 1 Degré de réalisme	Catégorie 2 Fonctions	Catégorie 3 Environnement
1	Nombre de segments	Base de données de mannequins	Création d'objets
2	Nombre d'articulations	Base de données de postures	Nb mannequin par environnement
3	Degrés de liberté	Modification de la posture	Animation de l'environnement
4	Limites physiques	Base de données d'actions	Contraintes mannequin/environnement
5	Représentation de la peau	Modification des actions	Contraintes entre mannequins
6	Représentation des muscles	Animation	Importation d'environnements
7	Anthropométrie	Réponse aux efforts	Base de données d'objets
8	Genre	Analyses statiques	Intuitivité de l'interface
9	Graduation du genre	Analyses dynamiques	
10	Age	Field of view	
11	Expression faciale	Enveloppe d'atteinte	
12	Compléments	Modèle de fatigue/ergonomique	
13	Dynamique des compléments	Détection de collisions	
14		Format d'importation/exportation	
15		Capture de mouvement	

Un code est défini pour permettre une identification rapide des différents critères. Ainsi, le critère 2 de la première catégorie sera appelé C1.2. Si les critères sont pour la plupart explicites, une définition mérite d'être précisée pour d'autres. Les limites physiques (C1.4) prennent en compte les contraintes physiques des articulations comme celles du genou et du coude par exemple. La graduation de genre (C1.9) prend en compte la représentation de l'évolution de la morphologie en fonction de l'âge. Les Compléments (C1.12) se réfèrent à la personnalisation possible des mannequins (vêtements, accessoires, etc).

Les critères C1.1, C1.2 et C1.3 ont été rassemblés sous le label « précision de la chaîne articulaire ». La différence entre mouvement et animation est légère et rarement perçue. Les critères allant de C2.4 à C2.6 ont ainsi été fusionnés. Concernant les données sur l'environnement, seuls les critères C3.1 et C3.8 ont été retenus. Certaines de ces informations n'ont en effet pas pu être récoltées pour plusieurs des logiciels, empêchant leurs intégrations dans l'étude comparative. La liste finale de critères comprend ainsi 25 éléments.

3.2 Remplissage du tableau (étape 4, Figure A.1)

Un tableau contenant les différents critères et logiciels est construit. Basé sur l'usage des logiciels, des recherches documentaires, l'étude de manuels et des témoignages d'utilisateurs, chaque case de ce tableau est remplie de manière textuelle.

3.3 Codage des critères

Pour réaliser l'analyse comparative, il est important de formaliser l'information textuelle contenue dans le tableau. Les critères (Tableau A.1) ont été codés suivant trois catégories. Premièrement, certains critères sont évalués selon une échelle à 5 points (0 – critère non satisfait, 1 – critère partiellement satisfait, 2 – critère plutôt bien satisfait, 3 – critère bien satisfait, 4 – critère complètement satisfait). Les critères concernés sont C1.1, 1.4, 2.1, 2.2, 2.4, 2.8, 3.11. Cette échelle est également utilisée pour évaluer la précision de l'information. Par exemple, la représentation de la peau peut varier d'inexistante (0), existante mais peu modifiable (1), jusqu'à complètement paramétrable (4). Cela est notamment le cas pour les critères C1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.12, 2.3, 2.9, 3.1. Enfin, des critères binaires sont également utilisés, en répondant par « oui » ou « non » à la présence de la fonction (une note de 4 est alors attribuée si la fonction est présente, et une note de 0 dans le cas contraire). Les critères C1.8, 1.10, 1.13, 2.7, 2.9, 2.10, 2.11, 2.13, 2.15 sont concernés par ce système de codage.

4. Les outils d'aide à la décision

Après avoir codé les informations textuelles contenues dans le tableau comparatif dans un format quinaire, des analyses statistiques multivariées (Analyse en Composantes Principales et Classification Ascendante Hiérarchique) sont utilisées pour construire un arbre de décision (Figure A.4). Ce dendrogramme permet de diviser les logiciels en plusieurs groupes homogènes, pour ainsi identifier différentes classes d'outils en fonction de certains critères principaux. Les méthodes et critères utilisés pour les analyses sont détaillés ci-après.

4.1 Analyses en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est utilisée pour réduire les dimensions de l'espace, permettant de représenter la proximité entre les individus et les variables, et de trouver les dimensions sous-jacentes. Les calculs sont basés sur une matrice composée des coefficients de corrélation de Pearson (le coefficient de Pearson étant un coefficient de corrélation classiquement utilisé). Les deux premiers facteurs représentent 64, 04% de la variabilité (seulement deux facteurs sont utilisés pour identifier les différences entre les logiciels).

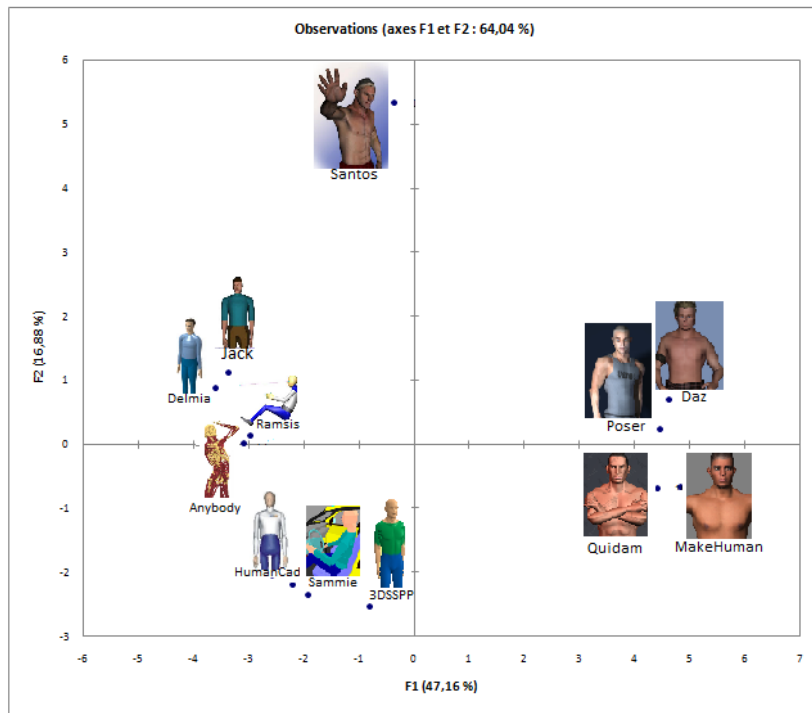


Figure A.3. Analyse en Composantes Principales.

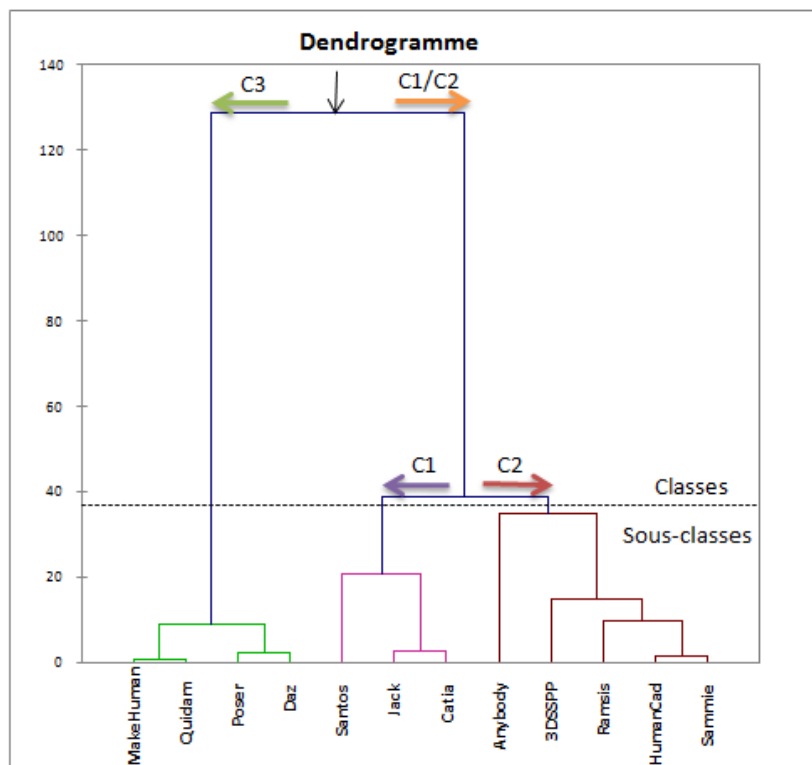


Figure A.4. Arbre hiérarchique des logiciels (Classification Ascendante Hiérarchique).

Dans notre cas (Figure A.3) la première composante principale est essentiellement constituée de critères basés sur le réalisme du mannequin, incluant les mouvements. Les logiciels sont clairement divisés en 2 groupes sur cet axe. Le premier sur le côté droit du diagramme, contenant Poser, Daz Studio, MakeHuman et Quidam, représente les logiciels permettant une simulation avec une haute qualité du rendu graphique. Les logiciels du second groupe (à gauche) ont un rendu graphique

inférieur, mais fournissent des fonctionnalités d'analyse plus élevées. La deuxième composante principale est corrélée aux critères basés sur des outils d'analyse tels que la détection de collisions ou les modèles de fatigue. Cela confirme la classification intuitive des critères réalisée auparavant.

4.2 Classification Ascendante Hiérarchique

Dans le but de distinguer les logiciels et de les organiser en groupes, similaires d'un point de vue analytique, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été réalisée. Le principe de la CAH est de construire un arbre hiérarchique, aussi appelé dendrogramme (Figure A.4), présentant le niveau de chaque agrégation selon la dissimilarité (indice d'agrégation) entre les individus (produits).

Les paramètres sont définis par le calcul des dissimilarités et des liens entre les classes, à partir de la distance et règle d'agrégation de Ward. A partir de l'arbre hiérarchique et des principaux critères discriminants identifiés, il est possible de définir un protocole pour déterminer le logiciel le mieux adapté aux attentes de l'utilisateur, et cela, avec un minimum de questions. Certains critères (variables) identifiés par les ACP et CAH sont regroupés ensemble sous forme de questions pour rapidement guider la recherche vers un groupe spécifique de logiciel. D'autres critères sont ensuite explicitement évalués permettant une sélection précise du logiciel. Cinq questions, impliquant certains critères discriminants, et concernant : la «capacité à réaliser des analyse», le «réalisme du mannequin», «l'animation du mannequin», «l'âge du mannequin» et «l'apparence humaine du mannequin», permettent de choisir rapidement le logiciel adéquat. Ces questions sont encodées dans une interface conviviale qui facilite la sélection du logiciel.

5. Conclusion

Cette étude présente une méthodologie permettant de développer un outil pour aider les designers à choisir le logiciel le mieux adapté à leurs besoins. Un certain nombre de données et paramètres concernant les caractéristiques techniques et les fonctionnalités de logiciels de modélisations ont été agrégés. Ces logiciels intègrent en effet un grand nombre de caractéristiques (construction de la chaîne cinématique, comportement du mannequin, apparence visuelle, etc.), souvent difficilement accessibles pour les utilisateurs. A partir de ces caractéristiques et d'une liste de 25 critères de comparaison, une Analyse en Composantes Principales et une Classification Ascendante Hiérarchique ont été réalisées pour construire un arbre de décision. Au total, douze logiciels numériques de modélisation humaine ont été comparés. En quelques questions, l'utilisateur est ainsi guidé vers un choix technologique adapté à ses attentes.

Il est évident que cette étude permet principalement de présenter une méthodologie de comparaison. Pour être totalement objective et représentative, la comparaison devrait être réalisée sur le panel complet de produits existant. De plus, les données utilisées devraient prendre en compte l'évolution des fonctionnalités des logiciels déjà existants, et la mise sur le marché des nouveaux produits. Ceci devrait passer par la création et l'automatisation de la mise à jour d'une base de données, réalisée à chaque nouvelle évolution du produit (indication des caractéristiques par les développeurs par exemple). Ainsi, les données techniques des logiciels seraient mieux disponibles, permettraient de fournir un support viable pour les utilisateurs.

Annexe B : Démarche I² pour la définition des interfaces comportementales du dispositif

La conception du dispositif de réalité virtuelle est basée sur la détermination des trois niveaux d'immersion et d'interaction (I²) liés à l'interfaçage comportemental (définition présentée Chapitre I).

1. Définition des I²

Au niveau des I² **fonctionnelles**, le dispositif doit permettre au designer d'interagir et de se comporter naturellement dans l'environnement virtuel, comme il le ferait avec un environnement physique réel. Il doit pouvoir se déplacer physiquement pour atteindre un point spécifique de l'environnement, changer sa posture (s'accroupir, se redresser, se pencher...), observer et identifier clairement les différentes parties de l'environnement à l'échelle 1, et toucher les différents éléments le composant. On peut définir les primitives comportementales virtuelles (PCV) fondamentales de la façon suivante:

- Observation complète à la première personne de tous les éléments (6ddl) composant l'environnement en respectant les dimensions réelles;
- Interaction physique réaliste avec ceux-ci ;
- Feedback de la position et du comportement du corps dans l'espace ;
- Déplacement physique dans un rayon proche de sa position (6ddl).

Ces PCV doivent être réalisées très facilement par le designer, et de façon totalement naturelle. Les autres PCV sont secondaires. Il n'est pas nécessaire de les simuler parfaitement car elles ne sont pas le sujet d'étude (hors I² fonctionnelles). Elles sont définies par :

- Retour de l'interaction entre la main et l'environnement;
- Déplacement rapide dans tout l'environnement.

La détermination des I² **cognitives** est réalisée à partir des I² fonctionnelles. Les PCV fondamentales associées sont:

- Exploitation du schème d'observation visuelle dans toutes les directions (observer l'EV) ;
- Exploitation du schème d'interactions physiques avec les différents éléments (agir sur l'EV) ;
- Exploitation du schème d'atteinte des différents éléments (agir sur l'EV) ;
- Exploitation du schème de navigation proche (se déplacer dans l'EV).

Les primitives secondaires :

- Exploitation d'un schème de déplacement.
- Exploitation du schème d'interactions entre la main et les éléments de l'EV.

Au niveau des I² **sensori-motrices**, il faut que les interfaces matérielles employées soient aussi naturelles que possible pour induire un temps d'adaptation minimal. Ainsi, l'immersion est maximale

et le designer oublie qu'il est face à un système informatique et il peut interagir naturellement avec l'environnement virtuel, comme il le ferait dans un environnement réel.

2. Détail des primitives de conception fondamentales

Observation dans le monde virtuel

Afin d'obtenir une immersion visuelle la plus naturelle possible, l'application doit permettre à l'utilisateur :

1. de visualiser l'environnement à l'échelle 1 ;
2. de regarder dans toutes les directions à 360° autour de lui ;
3. d'avoir une notion de profondeur, de hauteur et de translation permettant une immersion dans les 3D ;
4. de ne pas avoir de stimuli visuels extérieurs (réel) pour ne pas rompre la notion de présence.

L'environnement doit être affiché avec une grande résolution, correspondant aux capacités visuelles de l'utilisateur (acuité visuelle de 1' d'angle). Il faut que le champ de vision soit assez grand pour que le designer puisse être suffisamment immergé et qu'il puisse s'orienter facilement. La visualisation passe premièrement par un dispositif permettant l'intégration de l'utilisateur dans un environnement à l'échelle 1 avec une vue à la première personne. Ensuite, la configuration doit permettre au designer de regarder dans toutes les directions. Deux propositions sont alors envisageables :

- un dispositif extérieur couvrant tout le champ de vision. Le concepteur est immergé par des écrans tout autour de lui, comme avec un CAVE par exemple;
- un dispositif permettant un suivi en temps réel des 3 degrés de liberté en rotation de la tête couplé avec une restitution en temps réel de l'image virtuelle, comme un casque immersif par exemple.

Le designer ne doit pas avoir de retours visuels de son propre corps (réel) pour lui permettre de s'identifier complètement au mannequin virtuel et à ses mouvements. Nous choisissons donc le casque immersif comme dispositif de visualisation; car même immergé dans un cave par exemple, le sujet aurait un retour visuel sur la position de son corps, ce qui dans le cas propre de notre expérience ne permettrait pas une immersion cognitive correcte.

Enfin, l'observation de l'EV ne peut pas être limitée aux 3 degrés de rotation permettant une vue à 360°. Pour une évaluation robuste de l'environnement, il est indispensable que le dispositif permette de simuler les 6 degrés de liberté de la tête, c'est-à-dire également la hauteur de vision et les déplacements. Sachant que nous avons opté pour l'utilisation d'un casque immersif, nous choisissons d'ajouter un système de capture de mouvement, accordant un suivi précis en temps réel de la position de la tête dans l'espace (3 degrés de liberté restant). Le système sera donc réalisé par l'ajout d'un marqueur optique sur le casque immersif pour localiser les mouvements de la tête par le biais de cameras infra-rouge. Ainsi, si le designer se baisse pour atteindre un objet situé à terre par exemple, son point de vue change et se rapproche du sol, permettant une vision naturelle de l'EV.

Interaction physique avec l'environnement virtuel

Le choix de l'interface comportementale permettant l'interaction entre le designer et son environnement est une étape à bien considérer pour la réalisation de notre application de réalité virtuelle. En effet, l'objectif étant d'étudier l'atteinte d'un individu (position du corps, mouvements associés...) en fonction de ses caractéristiques physiques et des caractéristiques de l'environnement, le dispositif doit autoriser une implication physique du corps la plus naturelle possible. Dans notre cas, il serait tout à fait inapproprié d'utiliser des interfaces ne permettant pas une implication physique du corps (type souris ou joystick) pour manipuler le mannequin virtuel et interagir avec l'environnement. Il faut que les mouvements réalisés dans le monde virtuel soient identiques à ceux effectivement réalisés par l'utilisateur. Pour cela nous allons utiliser la même technologie que précédemment, c'est-à-dire que les positions et orientations des membres seront déterminées par le biais d'une capture de mouvement. L'avantage de la capture de mouvement est qu'elle permet d'exploiter un schème d'interaction très naturel et facilement admissible. La restitution des mouvements réalisés et la visualisation sont effectués en temps réel à une fréquence de 60Hz, permettant d'obtenir une cohérence complète entre le réel et le virtuel. En effet si la cinématique n'est plus cohérente avec les mouvements réels (phénomènes de latence par exemple), alors la notion de présence pourra être rompue. À noter qu'il n'est pas nécessaire d'exploiter un schème de manipulation et de préhension de la main car l'objectif ici est exclusivement d'étudier l'atteinte.

Pour que le designer immergé ait un retour visuel du corps de la personne simulée, un avatar virtuel complet sera créé. Ainsi couplé au dispositif, les mouvements de l'utilisateur seront fidèlement retranscrits au mannequin virtuel, représentant virtuellement la position et l'orientation des différentes parties du corps du designer dans l'EV, et visible au travers du casque immersif.

Position et comportement du corps dans l'espace

Pour que le comportement soit réaliste, il est essentiel que le designer ait un retour complet en temps réel de la position et de la cinématique des différentes parties du corps de la personne simulée. En effet, la tâche d'atteinte dépendant grandement des caractéristiques anthropométriques de l'individu, il est nécessaire de représenter fidèlement (d'un point de vue dimensionnel et cinématique) les différents membres du corps impliqués dans la tâche d'atteinte. Autrement dit, un simple schème représentant seulement la position traquée de la main ne peut être totalement suffisant pour étudier les comportements réalistes d'atteinte. Par exemple, l'atteinte d'un élément du tableau de bord d'une voiture pourra être visualisée par la position de la main, mais dépendra également de l'encombrement du corps (position et dimension des jambes, des bras, du buste etc.) par rapport à l'intérieur de l'habitacle. De même, l'accessibilité d'une commande sur un poste de travail ne dépendra pas seulement de l'atteinte ou non de la main sur la commande, mais également du comportement et des stratégies employées lors de l'atteinte, induits par l'interaction du bassin, des jambes ou des bras de l'opérateur avec l'environnement.

Interaction entre la main et l'environnement

L'utilisateur doit pouvoir évaluer l'atteinte par une indication de collisions entre ses mains et l'environnement. Ce retour peut être réalisé par le biais d'une interface haptique, simulant physiquement la collision par un retour d'effort au niveau du bras. Cependant, un tel dispositif

contraindrait l'utilisateur en termes de mobilité, et ne permettrait pas une simulation naturelle des mouvements induits par la tâche d'atteinte. C'est pourquoi des schèmes d'interactions sont exploités, permettant de représenter visuellement les contacts entre les parties du corps de l'avatar virtuel et l'environnement. Ainsi, dès qu'un contact est repéré entre la main et un élément, celui-ci prend une coloration rouge indiquant la collision. Tant que le contact est détecté, l'élément reste coloré. Dès que la main du mannequin n'est plus en contact, le composant reprend son apparence initiale avec un rendu réaliste. Ce schème peut être appliqué à toutes les parties du corps, permettant de mieux identifier le sujet par rapport à son environnement. Par exemple, si le sujet doit atteindre une commande au-dessus d'un plan de travail et qu'une collision est détectée entre les jambes du mannequin virtuel et le plan de travail, alors le changement de couleur permet de mettre en évidence que la posture utilisée induit un contact entre ses éléments.

Navigation dans l'environnement virtuel

Le déplacement dans la scène est à la fois lié à une primitive comportementale virtuelle fondamentale et une primitive secondaire. En effet, il est nécessaire que le designer puisse se mouvoir physiquement (déplacement et changement de posture) comme il le souhaite pour atteindre un point de l'environnement proche de lui (rayon de 2m environ). Cependant, il serait souhaitable que l'utilisateur puisse rapidement atteindre un point de l'environnement éloigné de sa position. Dans ce cas, la navigation peut être réalisée par un schème de déplacement, car nous n'étudions pas le déplacement dans l'environnement, mais les comportements d'atteintes. La navigation rapide dans l'EV est réalisée grâce aux touches directionnelles d'un clavier d'ordinateur (Figure B.1).

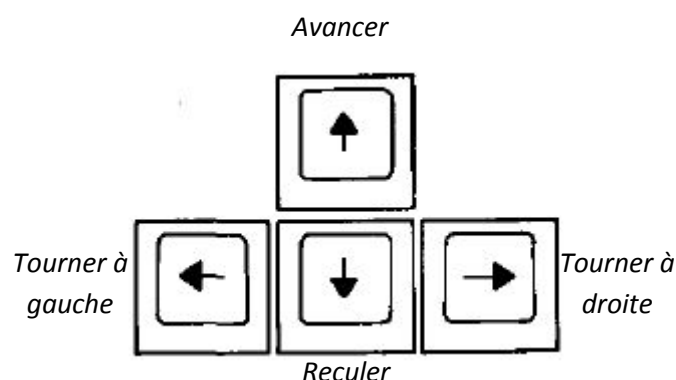


Figure B.1. Interface clavier pour la navigation rapide dans l'environnement virtuel.

3. Choix technologiques

Casque immersif

Pour notre application, nous avons choisi d'utiliser un Oculus Rift DK1 qui est un casque immersif se présentant sous la forme d'un masque recouvrant les yeux et attaché au visage par une sangle fermée à l'arrière du crâne. Un écran plat numérique est placé à quelques centimètres des yeux, perpendiculairement à l'axe du regard. Cet écran, couplé à deux lentilles situées en face de chaque œil, va permettre d'augmenter le champ visuel de telle sorte que l'image virtuelle ainsi créée se trouve projetée à l'infini. Avec un champ de vision supérieur à 110° horizontalement et 90° verticalement, l'Oculus va donner une sensation de recouvrement intégrale de la vision humaine.

Chaque écran bénéficie d'une résolution de 640x800, ce qui concède un rendu supérieur à 720p. Divers capteurs détectent les mouvements de tête de l'utilisateur, ce qui permet d'adapter en temps réel l'image projetée sur l'écran, afin de produire l'illusion d'une immersion dans la scène restituée.

Capture de mouvement

Le système de capture optique utilisé est le système ARTrack v2.8.1. Ce dispositif à "capture optique passive" est composé de 8 caméras infrarouges, admettant d'un grand volume de travail (cube de 4 mètres de côté) et offrant une action libre et directe des mouvements de l'utilisateur. Les huit caméras composant le dispositif permettent de scanner et de détecter la lumière provenant des marqueurs positionnés sur le corps. Ces marqueurs passifs sont rétro réfléchissant, c'est-à-dire qu'ils reflètent les radiations infra-rouges émises par les caméras (Figure B.2). Chaque caméra du système capture une image de la position des différents marqueurs selon un point de vue distinct. Ces images sont transmises à un ordinateur qui réalise une opération de triangulation afin de localiser chaque marqueur. La disposition géométrique des boules réfléchissantes étant propres à chaque marqueur, le système peut identifier précisément quel marqueur correspond à quelle partie du corps. Les données récoltées permettent ainsi d'identifier et de déterminer avec exactitude la position et l'orientation des différentes parties du corps dans l'espace. Ce type de système peut être tributaire de phénomènes d'occultation de certains marqueurs, c'est-à-dire que l'un des marqueurs peut se retrouver masqué par une partie du corps de l'opérateur ou un élément de l'environnement, masquant une ou plusieurs des images prises par les caméras, et empêchant la triangulation. C'est pourquoi notre système est composé de 8 caméras, pour s'affranchir de ce phénomène et capter de manière continue toutes les parties du corps, quelle que soit leur position dans l'espace.

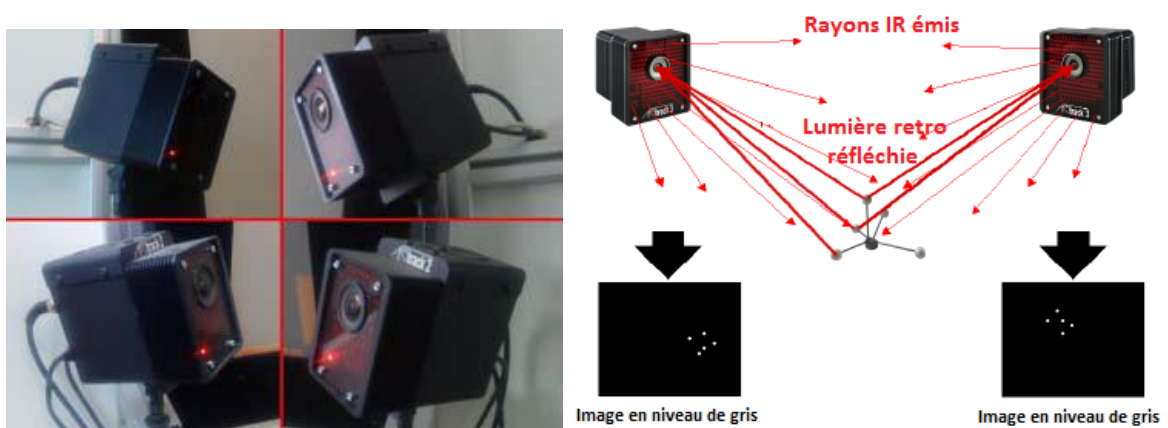


Figure B.2. Système ARTrack pour la capture de mouvement : caméras infrarouge (gauche) et principe du tracking optique (droite).

Annexe C : Couplage de la capture de mouvement avec le logiciel Unity3D 4.5.2

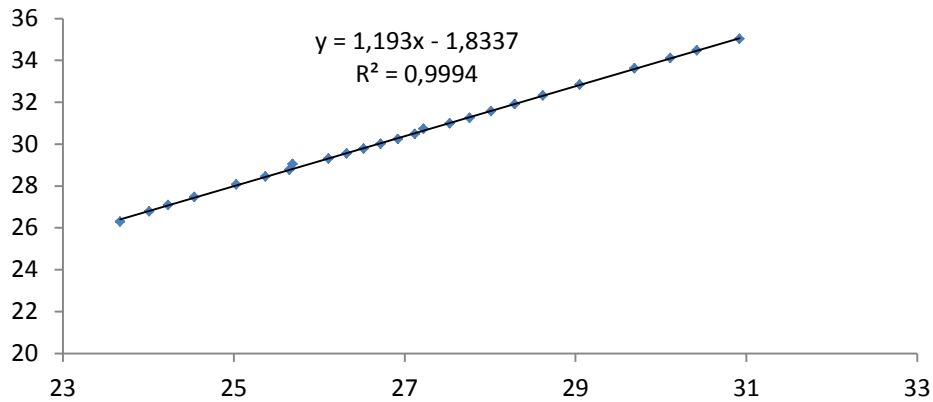
Le protocole permettant de faire le lien entre les données émises par le système de capture de mouvement et le logiciel Unity3D est le suivant :

1. Les caméras récupèrent la position et l'orientation des capteurs positionnés sur l'utilisateur.
2. Le flux de données est envoyé en temps réel par le système ART sur un réseau, à une fréquence de 60Hz.
3. Ce flux est récupéré par le protocole d'échange de données VRPN. Le VRPN (Virtual-Reality Peripheral Network) est une interface transparente agissant comme un serveur entre une application de réalité virtuelle tournant sur une machine, et des dispositifs physiques (capture de mouvement) connectés à d'autres machines d'un réseau. Ce programme récupère les données provenant de la capture de mouvement (logiciel Dtrack) pour ensuite les renvoyer sur le réseau, permettant de « standardiser » les données pour une lecture en aval par d'autres logiciels.
4. Les données sont ensuite récupérées par MiddleVR, qui est un plug-in immersif de réalité virtuelle générique conçu pour fonctionner avec différentes applications 3D. Celui-ci va permettre de gérer le dispositif d'interaction par capture de mouvement, d'importer et de coupler ces données avec Unity. MiddleVR prend notamment en charge la gestion des périphériques d'interaction (trackers 3D, Kinect...), la gestion de l'affichage stéréoscopique/3D, la manipulation d'objets 3D etc.
5. Enfin ces données sont envoyées au logiciel « Unity » nous permettant de développer l'application pour une gestion en temps réel d'objets 3D dans l'environnement virtuel.

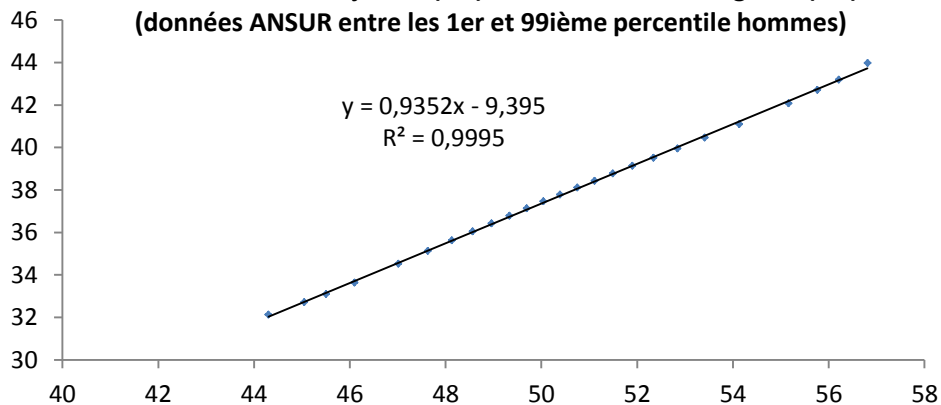
De même que pour la capture de mouvement, l'importation de la vision immersive de l'Oculus dans Unity se fait à partir de MiddleVr. L'Oculus fait en effet partie d'un des nombreux périphériques directement pris en charge par MiddleVr.

Annexe D : Corrélacion entre les longueurs des membres et leurs circonférences, d'après les données de la base ANSUR

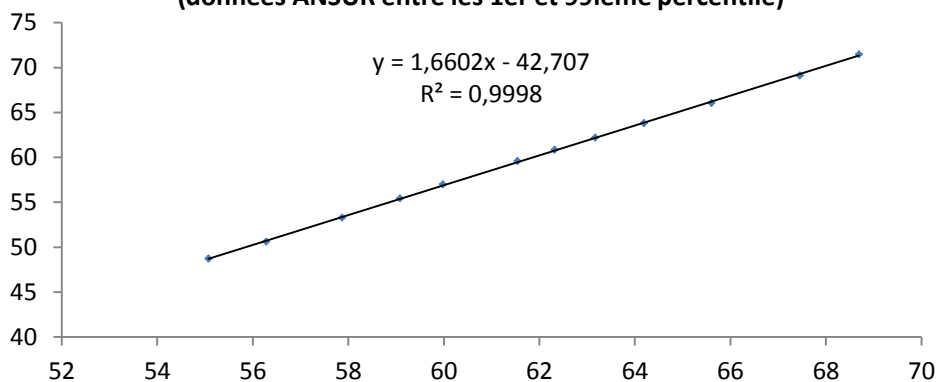
Circonférence de l'avant-bras (cm) en fonction de sa longueur (cm) (données ANSUR entre les 1er et 99ième percentile homme)



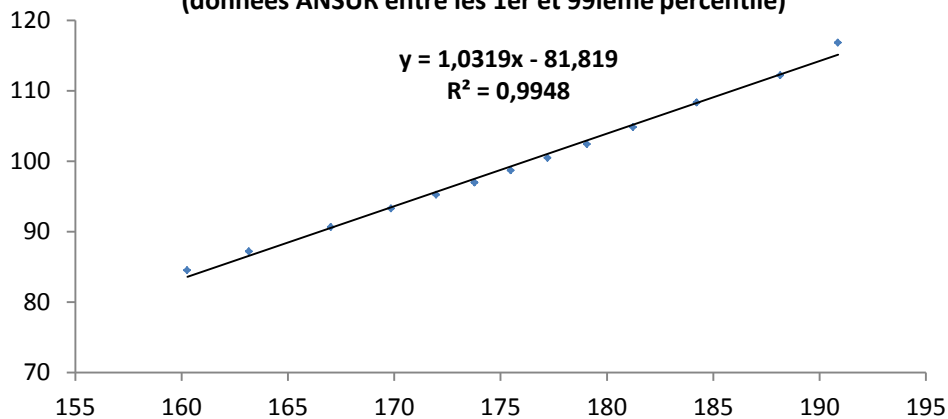
Circonférence de la jambe (cm) en fonction de sa longueur (cm) (données ANSUR entre les 1er et 99ième percentile hommes)



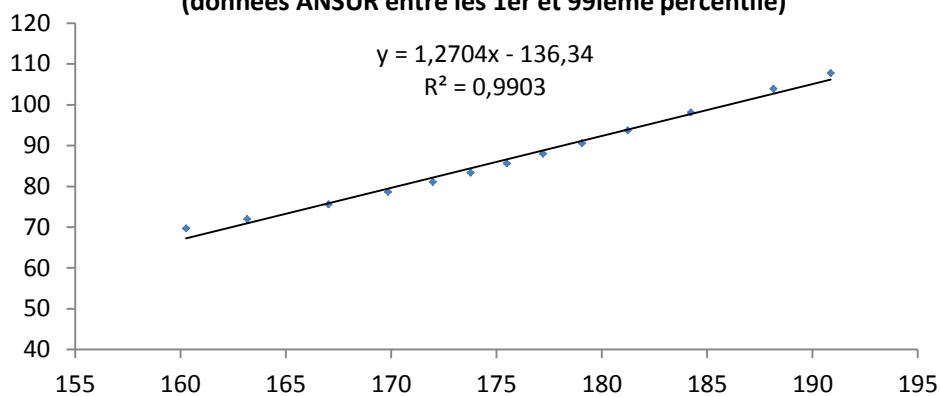
Circonférence de la cuisse (cm) en fonction de sa longueur (cm) (données ANSUR entre les 1er et 99ième percentile)



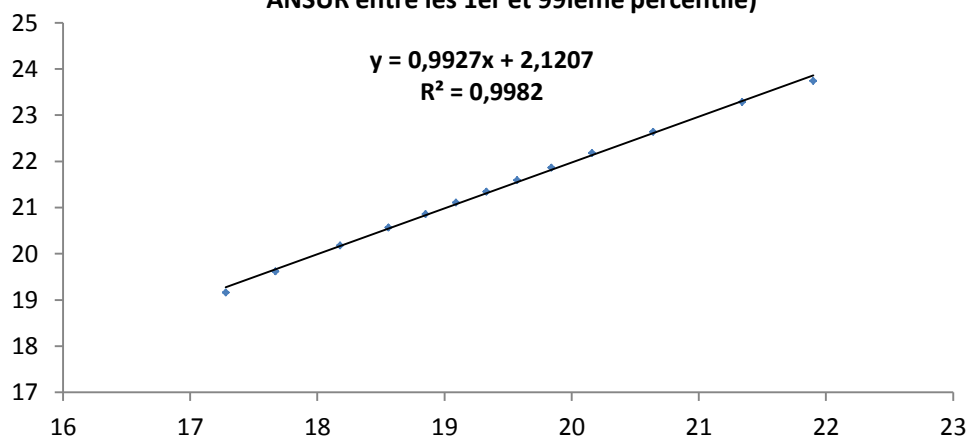
Circonférence du buste (cm) en fonction de la stature (cm)
(données ANSUR entre les 1er et 99ième percentile)



Circonférence du bassin (cm) en fonction de la stature (cm)
(données ANSUR entre les 1er et 99ième percentile)



Largeur de la main (cm) en fonction de sa longueur (cm) (données ANSUR entre les 1er et 99ième percentile)



Annexe E : Table de calcul du score lié à la posture des membres supérieurs

Table tirée de la méthode RULA définie dans McAtamney & Corlett (1993)

Bras	Avant-bras	Poignet							
		1		2		3		4	
		Pronation 1	Pronation 2	Pronation 1	Pronation 2	Pronation 1	Pronation 2	Pronation 1	Pronation 2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Annexe F : Interface utilisateur

La Figure F.1 est une capture d'écran de la première fenêtre de l'interface. La construction du mannequin est réalisée soit à partir de données spécifiques, soit par construction automatique à partir de données prédéfinies. Ce dernier cas de figure correspond à la sélection de "mannequins types" anthropométriquement représentatifs d'une certaine classe de la population (50^{ième} percentile homme par exemple). Ces catégories de mannequins sont classiquement rencontrées dans les logiciels de modélisation (voir étude des logiciels de modélisations humaines Chapitre 1).

La Figure F.2 représente la fenêtre de l'interface permettant d'indiquer les données anthropométriques de l'opérateur. Cette étape permet d'initialiser la simulation pour que les mouvements du mannequin virtuel et de l'opérateur en immersive soient correctement couplés. Celle-ci est toujours réalisée, que le mannequin soit défini à partir des données spécifiques ou non. La fenêtre Figure F.3 permet l'intégration des données anthropométriques spécifiques du sujet à simuler. La corpulence et le genre sont également renseignés. La Figure F.4 représente la sélection de mannequin représentatif du 5ième, 50ième ou 95ième percentile homme ou femme. La Figure F.5 est une capture d'écran de la fenêtre permettant de renseigner les capacités physiques du sujet. Les amplitudes articulaires admissibles sont directement indiquées en degrés dans les cases correspondantes (les valeurs par défaut sont celles des amplitudes biomécaniques maximales). Enfin, les Figure F.6 et Figure F.7 permettent respectivement d'intégrer automatiquement les fonctionnalités développées, et de lancer la simulation. A noter que bien que la Figure F.6 présente l'activation du pseudo-haptique appliqué à l'avant-bras du mannequin, cette fonctionnalité est, comme précisé dans le Chapitre IV, toujours en cours de développement.



Figure F.1. Page d'accueil de l'interface. Permet de choisir entre une construction du mannequin à partir de données spécifiques ou par sélection de mannequins prédéfinis.

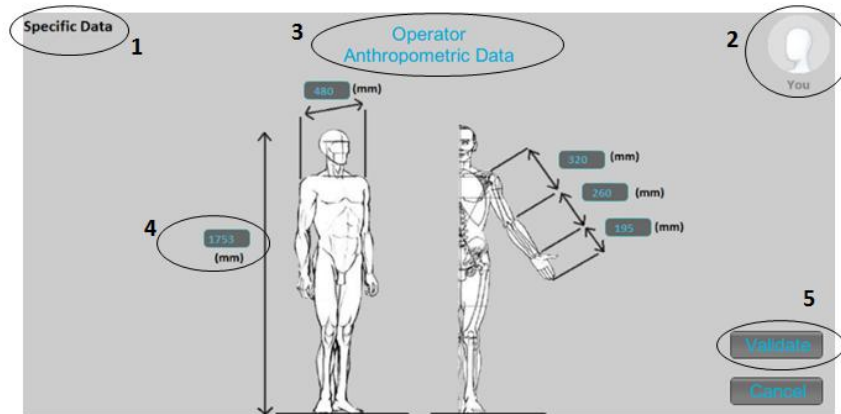


Figure F.2. Composition de l'interface utilisateur. La zone 1 indique le type de données choisies à partir de la page d'accueil. Les zones 2 et 3 indiquent textuellement et visuellement le type de données à renseigner. Les régions en 4 permettent d'entrer les valeurs anthropométriques correspondantes. Les boutons en zones 5 permettent la navigation d'une page à l'autre. La page présentée permet l'initialisation de la simulation par l'intégration des données anthropométriques de l'opérateur en immersion.

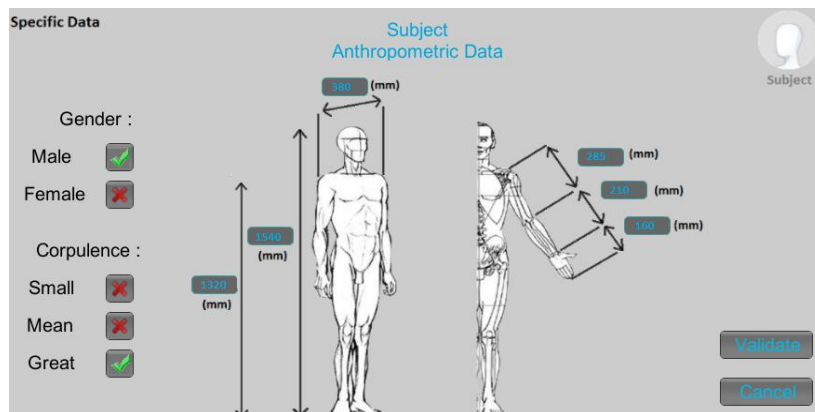


Figure F.3. Intégration des données spécifiques liées au sujet. Les valeurs numériques en entrée sont : la stature, la hauteur d'épaule, la largeur d'épaule, la longueur de bras, d'avant-bras et de main. Un coefficient de poids est intégré automatiquement par la combinaison des boîtes de dialogues renseignant le sexe et la corpulence du sujet. Cette page est seulement disponible dans la partie "données spécifiques".

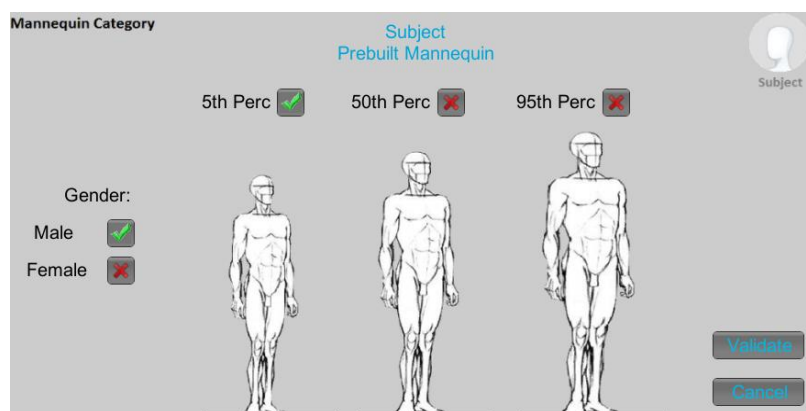


Figure F.4. Définition automatique d'un mannequin représentatif du 5^{ème}, 50^{ème} ou 95^{ème} percentile homme ou femme, construit à partir des données extraites de la base ANSUR. Cette page est seulement disponible dans la partie "Mannequins prédéfinis".

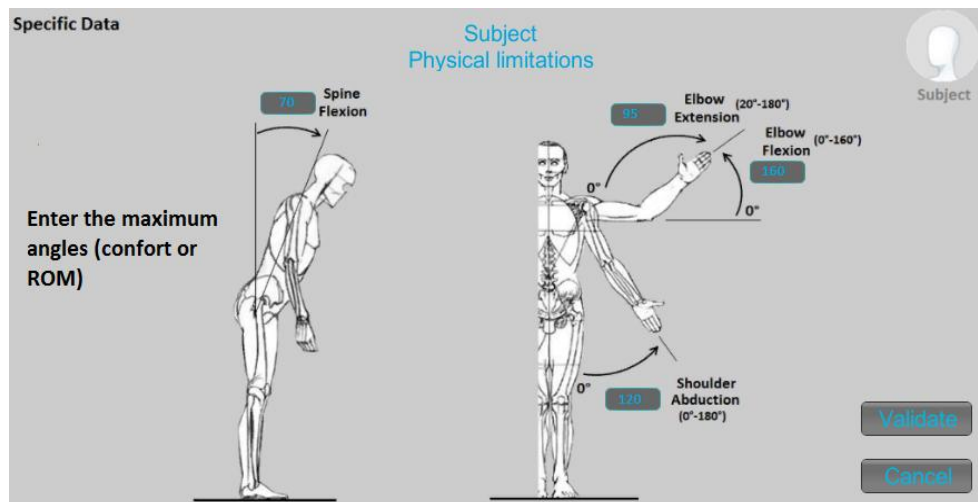


Figure F.5. Intégration des capacités/limitations du sujet. Les données numériques d'entrée sont l'angle de flexion du tronc, l'extension/flexion de l'avant-bras (coude), et l'abduction du bras (épaule). Les données articulaires indiquées correspondent aux angles de confort maximum ou bien à l'amplitude maximale.

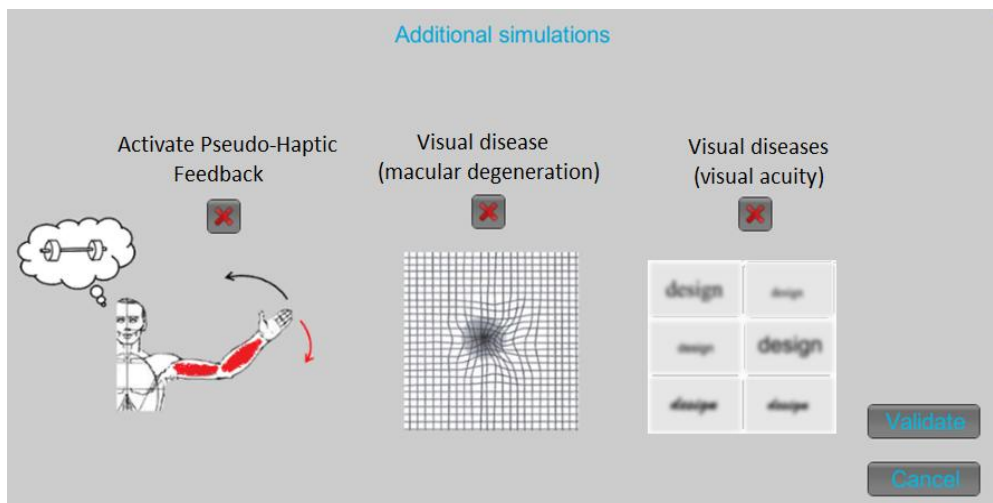


Figure F.6. Intégration dans la simulation des fonctionnalités particulières développées.

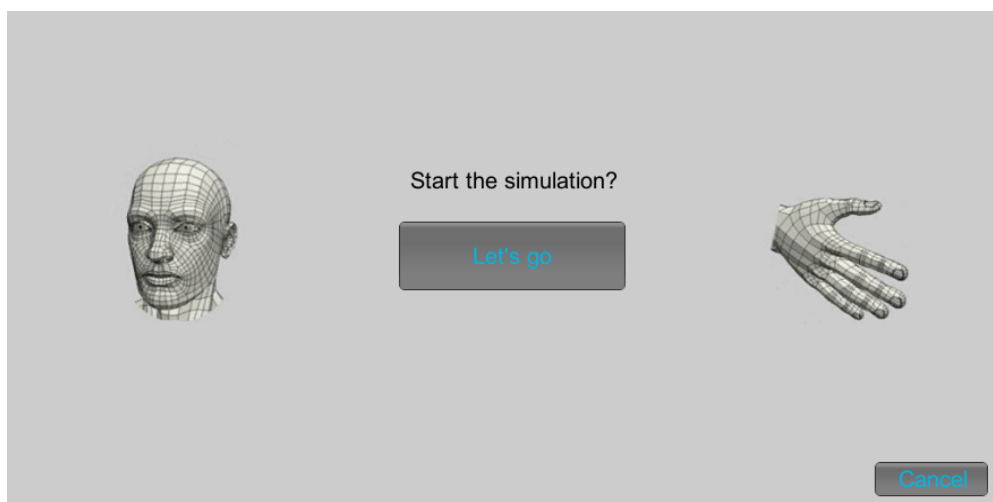


Figure F.7. Permet de lancer la simulation. L'intégration des données renseignées est réalisée une fois cette étape validée.

Annexe G : Exemples d'applications en fonction du niveau de connaissance

Tableau lié à la Figure 6-31 paragraphe 6.6.2 Chapitre III.

Scénario Code	Connaissances anthropocentrées	Résultats qualitatifs en sortie	Exemple de cas d'applications
A.α.1	Limites de confort spécifiques et caractéristiques anthropométriques d'un sujet particulier	Dépassement des zones de confort	Reconception ergonomique d'un poste de travail pour un opérateur spécifique en fonction de ses limites de confort (design « sur mesure »)
A.α.2	Caractéristiques anthropométriques spécifiques d'un sujet particulier	Evaluation des risques ergonomiques	Evaluation de l'ergonomie d'un poste de travail pour un opérateur spécifique à partir de normes ergonomiques prédéfinies (règles d'évaluations RULA)
A.β.1	Amplitudes articulaires spécifiques et caractéristiques anthropométriques d'un sujet particulier	Dépassement des amplitudes articulaires max	Reconception ergonomique d'un poste de travail pour un opérateur spécifique en fonction de ses amplitudes articulaires (évaluation de l'atteinte d'un bouton d'arrêt d'urgence par exemple)
A.β.2	Caractéristiques anthropométriques spécifiques d'un sujet particulier	Dépassement des amplitudes articulaires prédéfinies	Etude de l'impact de limitations sur les capacités physiques d'un individu spécifique
B.α.1	Limites de confort spécifique	Dépassement des zones de confort	Evaluation pour des limites de confort particulières
B.α.2	-	Evaluation des risques ergonomiques	Evaluation ergonomique pour une population "type" (classiquement présentes dans certains logiciels). Conception d'un environnement répondant aux besoins d'une grande partie de la population.
B.β.1	Amplitudes articulaires spécifiques	Dépassement des amplitudes articulaires max	Evaluation d'un environnement pour des limites articulaires particulières liées à un handicap spécifique
B.β.2	-	Dépassement des amplitudes articulaires prédéfinies	Exploration de l'environnement pour des caractéristiques anthropométriques et physiques "types"

Annexe H : Retour pseudo-haptique

Changement de cinématique de l'extension de l'avant-bras, définissant le retour pseudo-haptique chez l'utilisateur. Représentation du code en C#. Pour des raisons de clarté, nous avons choisi de **ne représenter que le principe appliqué**, permettant le changement de cinématique et la sensation d'effort associée. Le code ci-dessous n'est donc pas strict au sens du langage de programmation C#, et ne représente pas la complexité du code réellement développé.

```
float Angle_limit_elbow_ext; // Limite angulaire initiale
float kinematic_coef; // Coefficient du changement de cinématique (-<1)
Vector3 uparm = Arm.transform.up; // Vecteur lié à l'axe longitudinal du bras
Vector3 upforearm = ForeArm.transform.up; // Vecteur lié à l'axe longitudinal de l'avant-bras

float Angle_elbow_ext = Vector3.Angle (upforearm, uparm); // Angle d'extension entre l'avant-bras et le bras

if (Angle_elbow_ext < Angle_limit_elbow_ext) { // Si l'angle d'extension réelle de l'avant-bras est // inférieur à la limite définie à l'initialisation

    Extension_virtuelle = Extension_réelle; // L'extension de l'avant-bras virtuel est identique // à celle effectivement réalisée par l'opérateur
}
else if (Angle_elbow_ext > Angle_limit_elbow_ext) { // Si l'angle d'extension réelle de l'avant-bras est // supérieur à la limite définie à l'initialisation

    Extension_virtuelle = Extension_réelle*kinematic_coef; // L'extension de l'avant-bras virtuel est modifiée // par le coefficient.L'extension virtuelle est donc // inférieure à celle effectivement réalisée.
}
}
```

Annexe I : Représentation des déficiences mises en jeu sous forme de graphique à barre

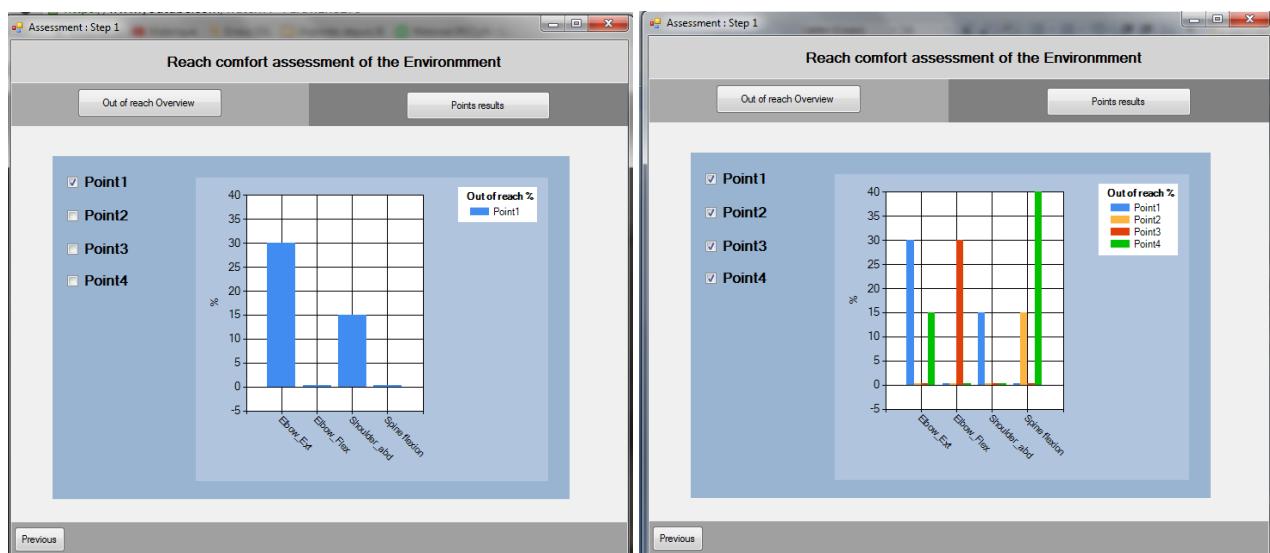


Figure I.1. Vue graphique des résultats de l'analyse avec choix des points à afficher (à gauche : un seul point sélectionné, à droite : plusieurs points sélectionnés).

Annexe J : Dimensions des différentes configurations étudiées

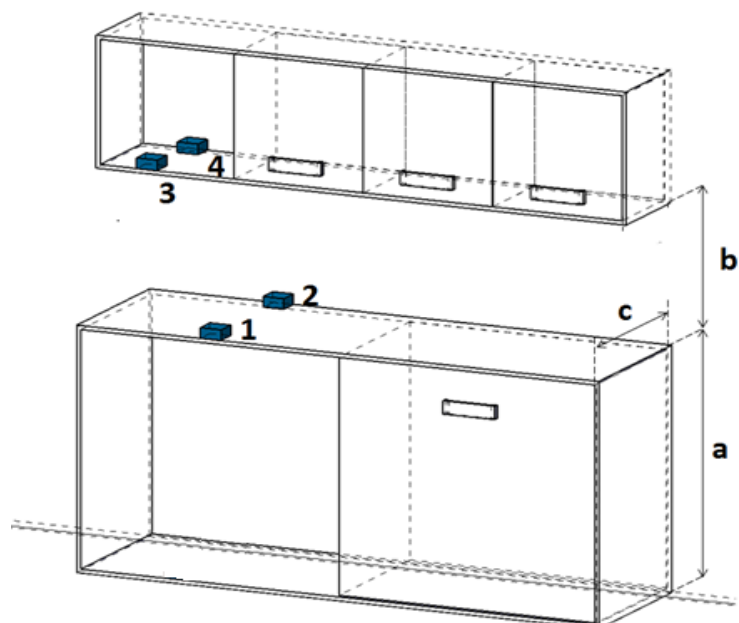


Figure J.1. Représentation schématique des éléments de la cuisine étudiés et des variables dimensionnelles associées; avec a/ la hauteur du plan de travail, b/ la hauteur de placard, et c/ la profondeur du plan de travail.

Tableau J.1. Changement des variables dimensionnelles de la cuisine entre les configurations étudiées.

Variables	Config.1	Config.2	Config.3
a (m)	0.9	0.7	1.1
b (m)	0.55	0.55	0.55
c (m)	0.6	0.6	0.6

Annexe K : Questionnaire

1. D'un point de vue général, comment jugeriez-vous l'utilisation du dispositif de réalité virtuelle ?
1 signifiant **très difficile à utiliser**, 4 signifiant **très facile à utiliser**; NSP = ne se prononce pas
- 1 2 3 4 NSP
2. Selon vous, est-ce que le dispositif a permis de **favoriser la discussion** et les échanges d'idées entre les différents membres de l'équipe ? *(une seule réponse possible)*
- Oui
 Non
 Ne sais pas
3. Comment qualifieriez-vous l'influence du dispositif utilisé sur la **motivation du groupe projet à travailler ensemble** ?
1 signifiant **pas du tout motivant**, 4 signifiant **très motivant**; NSP = ne se prononce pas
-
4. Comment jugeriez vous la prise en main du dispositif et des différentes interfaces utilisées ?
- 1 signifiant **pas du tout rapide**, 4 signifiant **très rapide**; NSP = ne se prononce pas
- 1 2 3 4 NSPNSP
5. Comment jugeriez-vous la simulation d'un point de vu général (graphique et cinématique) ?
1 signifiant **pas du tout réaliste**, 4 signifiant **très réaliste**; NSP = ne se prononce pas
- 1 2 3 4 NSP
6. Jugeriez-vous l'utilisation du matériel contraignante ?
- Oui
 Non
 Ne sais pas
- Si oui, pensez-vous que l'apport est supérieur à la contrainte ?
- Oui
 Non
 Ne sais pas
7. D'un point de vu général, comment jugeriez-vous la charge physique engendrée par les interfaces de réalité virtuelle utilisées ?
- 1 signifiant **très fatiguant**, 4 signifiant **pas du tout fatiguant**; NSP = ne se prononce pas
- 1 2 3 4 NSP
8. Comment qualifieriez-vous les apports de l'utilisation du dispositif de réalité virtuelle sur l'évaluation du produit et de son usage ?
- 1 signifiant **très faible**, 4 signifiant **très forte**; NSP = ne se prononce pas
- 1 2 3 4 NSP
9. Selon vous, le dispositif utilisé peut-il faciliter l'exploration et la proposition de nouvelles solutions de conception ? *(une seule réponse possible)*

-
- Oui
 - Non
 - Ne sais pas

10. Jugeriez-vous que ce type d'outil puisse aider à découvrir et comprendre les besoins, capacités et attentes d'utilisateurs en situation de handicap?

1 signifiant **pas du tout**, 4 signifiant **complètement**

- 1 2 3 4 Sans avis

11. Comment évaluez-vous la **contribution du dispositif** dans la conception et l'évaluation d'environnements adaptés aux personnes ayant des besoins spécifiques (situation de handicap par exemple) ?

1 signifiant **très faible**, 4 signifiant **très forte**; NSP = ne se prononce pas

- 1 2 3 4 NSP

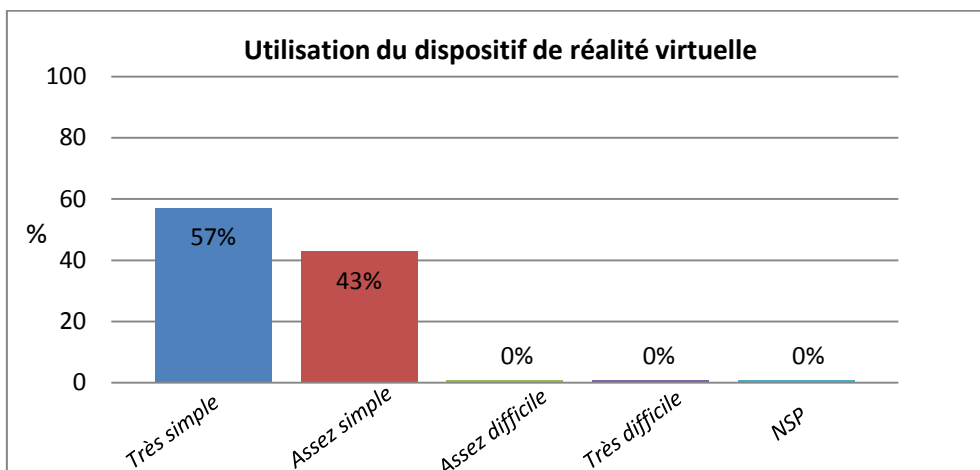
12. D'un point de vu général, comment jugeriez-vous le dispositif de réalité virtuelle pour soutenir et à favoriser la conception d'environnements universels ?

1 signifiant **pas du tout utile**, 4 signifiant **extrêmement utile**; NSP = ne se prononce pas

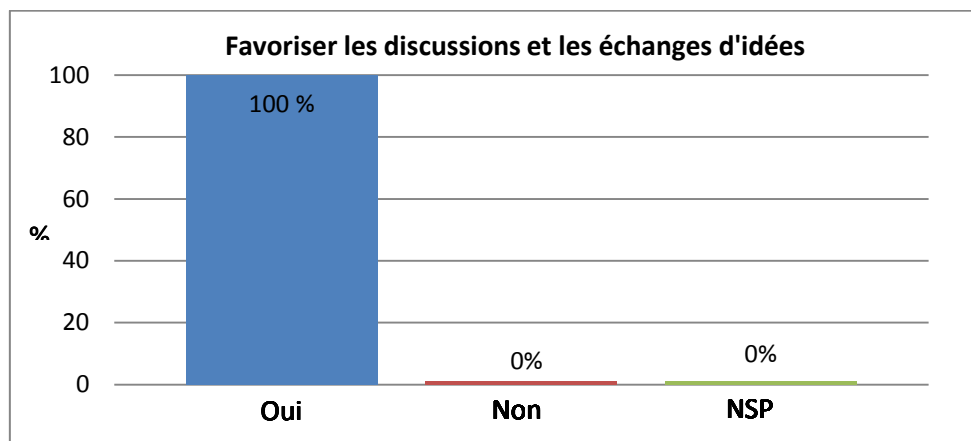
- 1 2 3 4 NSP

Remarques

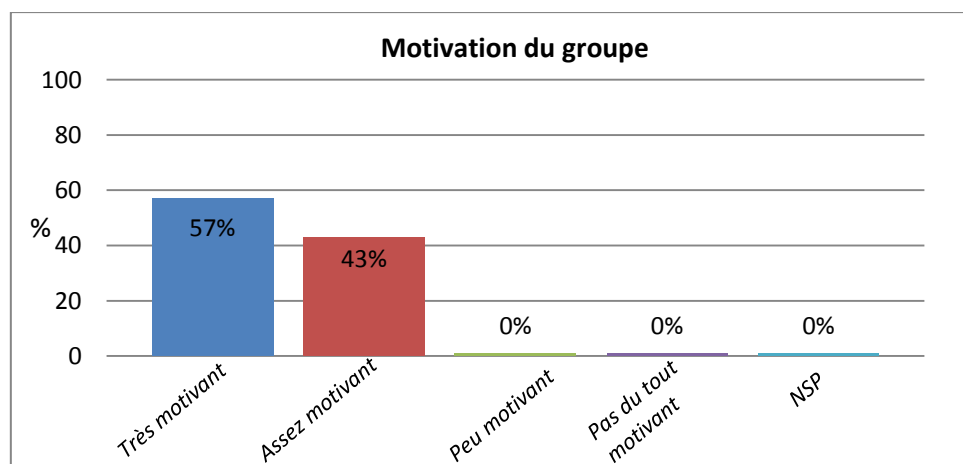
Annexe L : Résultats de l'évaluation qualitative



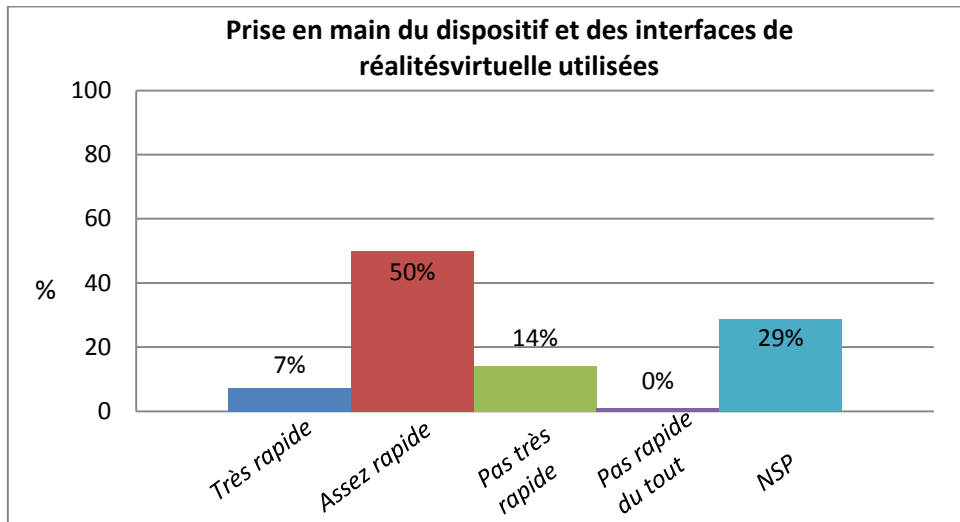
Question 1



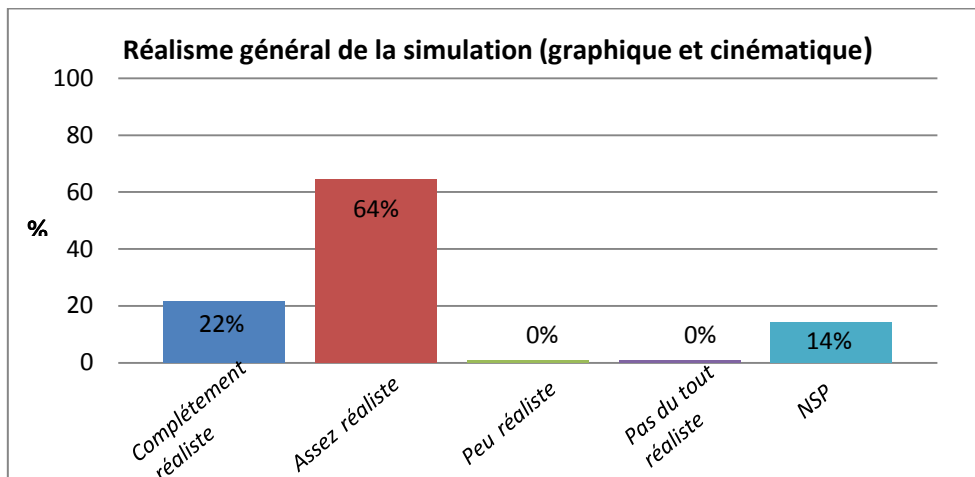
Question 2



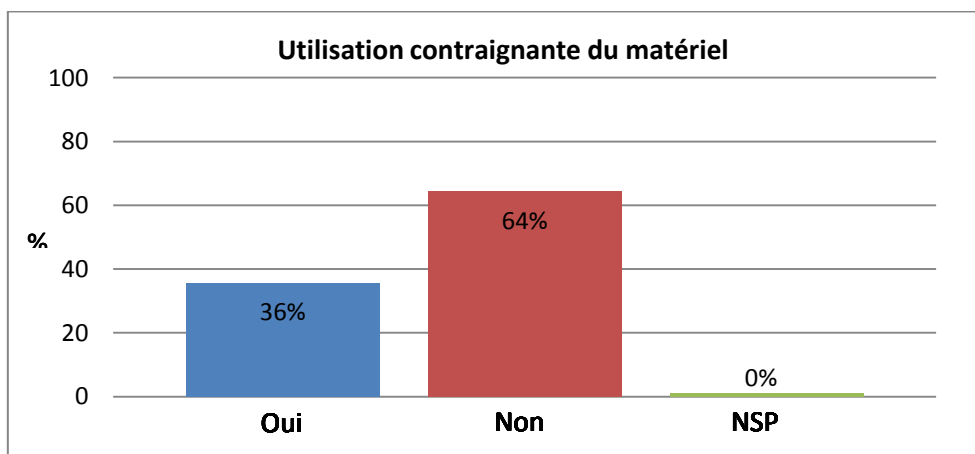
Question 3



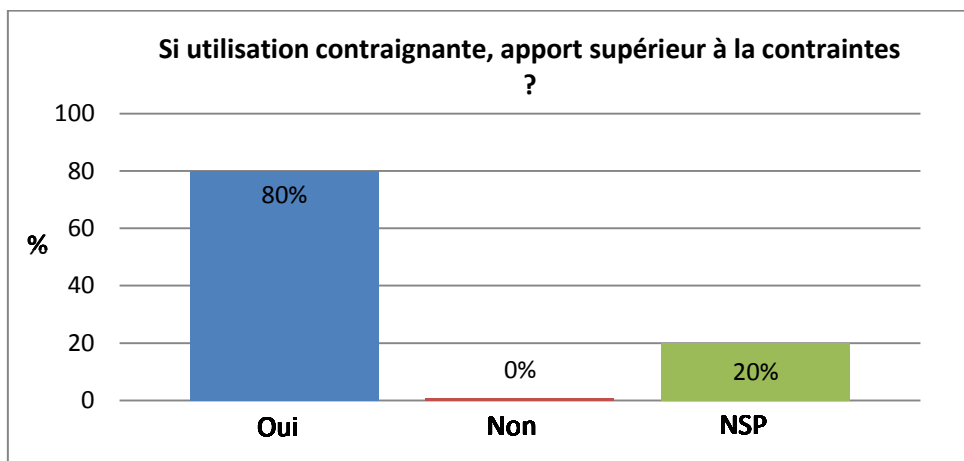
Question 4



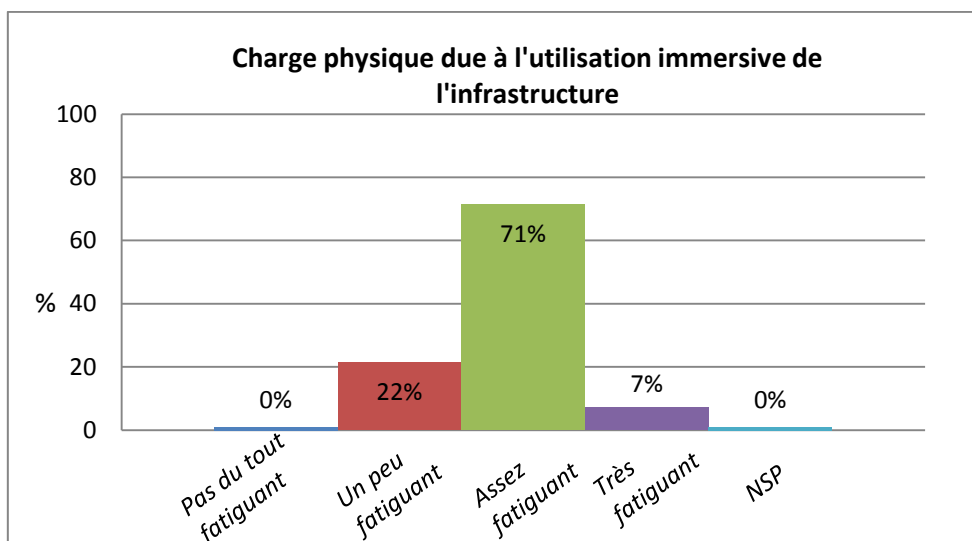
Question 5



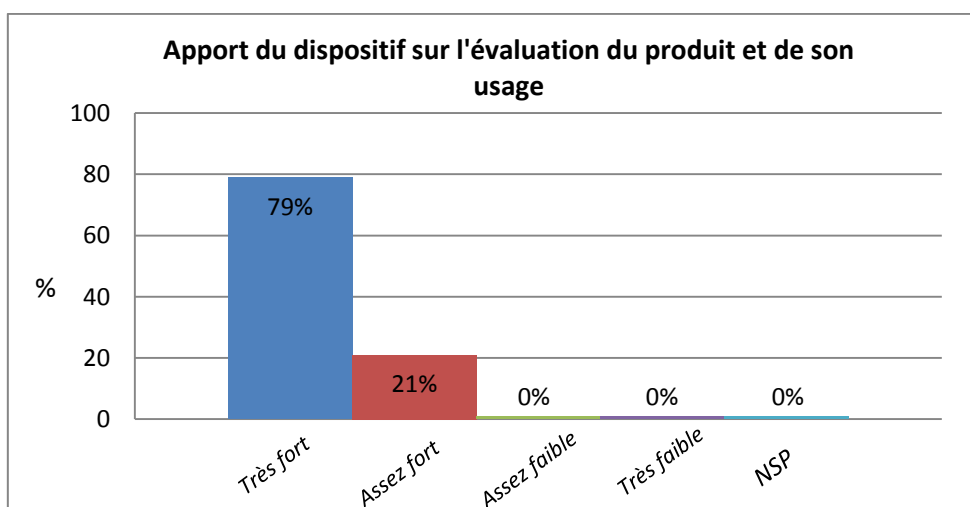
Question 6a



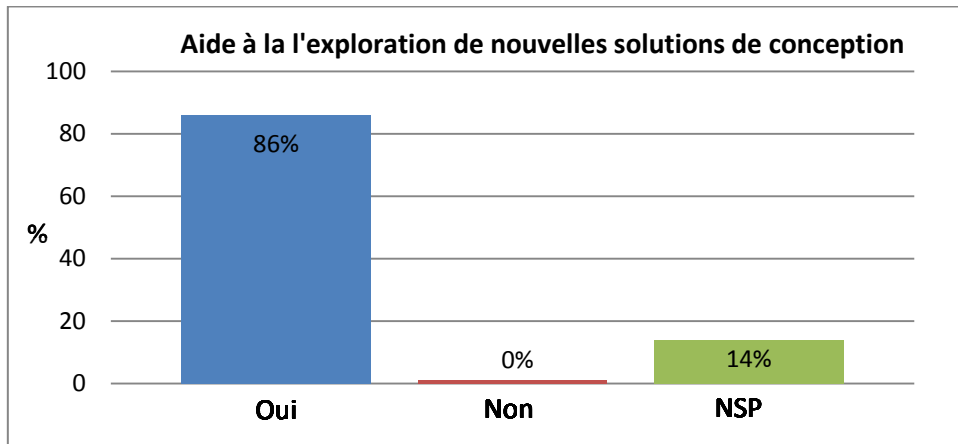
Question 6b



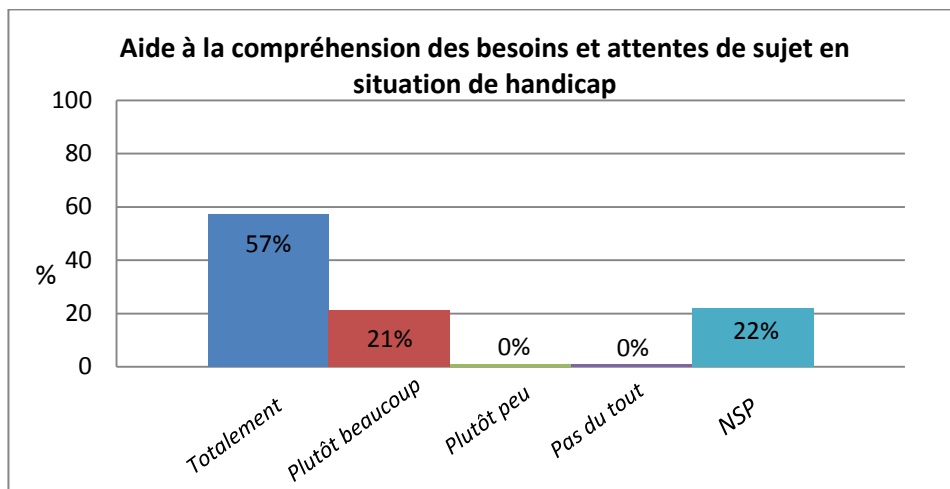
Question 7



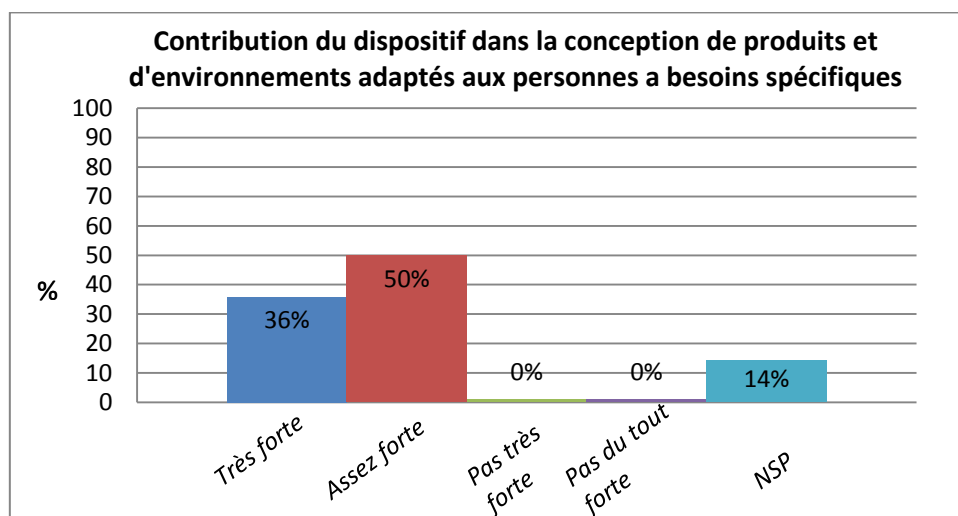
Question 8



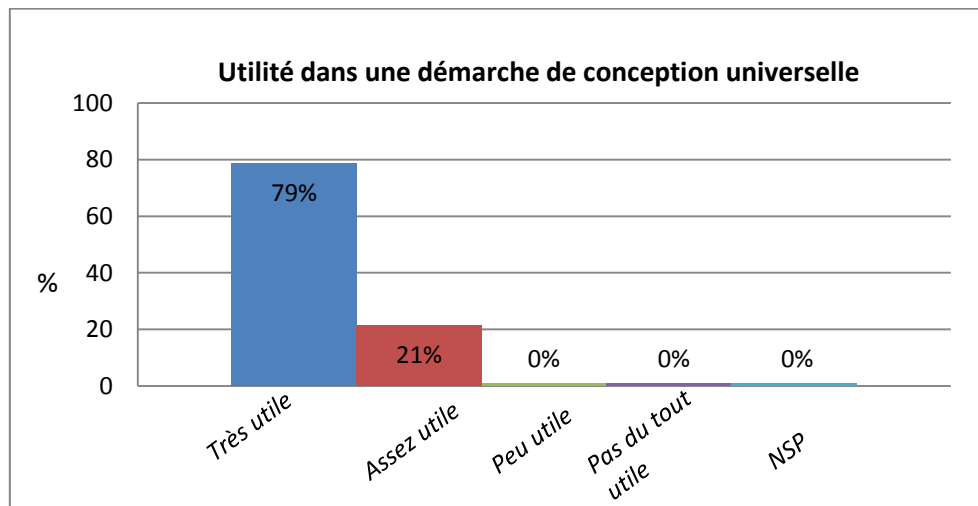
Question 9



Question 10



Question 11



Question 12

Thèse de Doctorat

Mathieu DELANGLE

Outils de réalité virtuelle pour la conception universelle

Résumé

La conception universelle est une démarche de conception de produits et d'environnements, dont l'usage est destiné à tous, dans la plus large mesure, sans besoin d'adaptation ou de conception spéciale. Une telle démarche implique la prise en compte simultanée d'une grande variété d'utilisateurs (caractéristiques physiques, cognitives, morphologiques, etc. très différentes) durant la conception du produit, de manière à réduire l'exclusion de certaines catégories de personnes (personnes en situations de handicap, personnes âgées, etc.). Les concepteurs doivent ainsi pouvoir s'appuyer sur des outils et des méthodologies, leurs permettant d'intégrer au mieux ce facteur humain, tout au long du processus de conception (tests physiques, simulations numériques, etc.). Depuis quelques années, la réalité virtuelle est de plus en plus utilisée dans l'industrie, pour visualiser, tester, et analyser virtuellement un produit en cours de conception. En effet, la réalité virtuelle permet d'entraîner une personne dans une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, et pouvant simuler certains aspects du monde réel.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'utilisation de la réalité virtuelle dans le domaine spécifique de la conception universelle. Au travers d'une approche méthodologique, nous nous concentrons premièrement sur la modélisation et l'intégration des caractéristiques morphologiques et comportementales des utilisateurs, par l'utilisation conjointes de mannequins numériques et d'interfaces de réalité virtuelle. Ensuite, nous proposons le développement d'un dispositif basé sur l'exploitation d'un moteur de jeu vidéo, permettant d'améliorer la modélisation des caractéristiques anthropométriques et des déficiences spécifiques des utilisateurs. Par le biais d'une étude expérimentale, nous présentons également l'application de celui-ci comme système d'évaluation et de conception collaboratif. D'une manière générale, nous précisons les apports de nos travaux concernant la conception du produit et de son usage, ainsi que dans la modélisation des capacités spécifiques, et de leurs impacts sur l'activité de l'utilisateur (prise en compte des stratégies d'adaptations).

Mots clés

Réalité virtuelle, conception universelle, facteur humain, évaluations immersives, modélisation temps réel.

Abstract

Design for all or "universal design" refers to ideas meant to produce products and environments usable by all, to the greatest extent possible, without the need for adaptation or specialised design. A such approach involves to simultaneously take into account a broad-spectrum of users with different characteristics (physical, cognitive, morphological, etc.) during the product design, in order to reduce the exclusion of certain categories of persons (disabled persons, elderly, etc.). So, designers need to rely on tools and methodologies to integrate this human factor, throughout the design process (physical trials, numerical simulations, etc.). In recent years, virtual reality is increasingly used in industry to visualise, test, and virtually analyse a product under design. Indeed, virtual reality allows leading a person in a cognitive and sensory-motor activity, in an artificial world created digitally, and simulating some aspects of the real world.

In this thesis, we focus on the use of virtual reality in the specific field of universal design. Through a methodological approach, we focus firstly on the modeling and the integration of anthropometric and behavioral characteristics of users, by the use of numerical mannequins and virtual reality interfaces. Then, we propose the development of a virtual reality platform, based on the use of a video game engine, in order to improve the modeling of specific anthropometric characteristics and deficiencies of users. Through an experimental study, we also present the application of this platform as an evaluation and collaborative design system. Finally, we specify the contributions of our work concerning the design of the product and its use, as well as the modeling of specific capacities, and their impact on the user's activity (adaptation strategies).

Key Words

Virtual reality, universal design, human factor, immersive evaluations, real time modelling.