



HAL
open science

Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception

Abdelmajid Kadri

► **To cite this version:**

Abdelmajid Kadri. Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception. domain_other. Université d'Angers, 2007. Français. NNT : . tel-00345864

HAL Id: tel-00345864

<https://theses.hal.science/tel-00345864>

Submitted on 10 Dec 2008

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.

**Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits,
dans les phases amonts du processus de conception.**

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

ÉCOLE DOCTORALE D'ANGERS

Présentée et soutenue publiquement

le : 4 juillet 2007

à : l'Université d'Angers

par : Abdelmajid KADRI

Devant le jury ci-dessous :

Patrick BOURDOT (Rapporteur), Chargé de Recherche, CNRS

Frédéric MERIENNE (Rapporteur), Professeur, ENSAM

Hervé CHRISTOFOL (Examinateur), Maître de Conférences, Université d'Angers

Anatole LECUYER (Examinateur), Chargé de Recherche, INRIA

Henri SAMIER (Examinateur), Maître de Conférences, Université d'Angers

Directeur de Thèse : Simon RICHIR, Professeur, ENSAM

Laboratoire Presence & Innovation – ENSAM Angers-Laval

À mes parents

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier Simon Richir pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire Presence & Innovation et pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant de diriger cette thèse.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance envers Patrick Bourdot et Frédéric Merienne qui m'ont fait l'honneur d'être mes rapporteurs. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leurs nombreuses remarques qui m'ont permis d'affiner le contenu de ce document.

Je remercie et exprime toute ma gratitude à Henri Samier et Hervé Christofol pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont porté à mes travaux de recherche et pour avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse.

Je remercie tout spécialement Anatole Lécuyer, pour son investissement, son esprit critique et ouvert, ses conseils et pour avoir accepté d'être examinateur de ce travail. Travailler avec toi fut pour moi un grand honneur et un réel plaisir.

Je tiens ensuite à remercier les personnes qui ont contribué à cette thèse : Claude Andriot pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et pour avoir accepté de partager son expertise en matière de réalité virtuelle et de retour haptique. Jean-Marie Burkhardt pour sa grande contribution aux analyses de résultats de l'expérimentation concernant l'influence des avatars. L'ensemble des personnes avec qui j'ai eu plaisir à travailler au sein de la société ROSSIGNOL S.A.

Merci également à tous mes collègues et amis du laboratoire Presence & Innovation et de l'ISTIA pour leur soutien et leurs conseils avisés : Akihiko, Alain, Angèle, Anthony, Cécile, Evelyne, Fabien, François, Grégoire, Laurence, Lionel, Malika, Niloofar, Pascal, Stéphanie, Teddy, Yazid, ...

Une thèse est un travail long, qui nous rend souvent peu disponible physiquement et psychologiquement. Je tiens à remercier mes amis et surtout ma famille, les présents comme les absents, d'avoir su me supporter et me soutenir pendant cette période et de m'avoir accompagné au quotidien jusqu'à la dernière ligne droite.

Je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur confiance, leurs encouragements et pour leur conviction dans l'ascension par les études, malgré un contexte financier difficile. Je remercie aussi mes frères et sœurs pour leur compréhension et leur soutien moral. Enfin, mes derniers remerciements vont à Houda qui m'a accompagné durant toute cette aventure. Je te remercie pour ta patience et ton soutien sans failles.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Positionnement et Objectifs	1
1.2	Organisation du document	3
2	La Réalité Virtuelle (RV).....	4
2.1	Définition de la RV	4
2.2	Historique de la RV	7
2.3	Les environnements de RV	11
2.3.1	<i>Les environnements immersifs</i>	11
2.3.2	<i>Les environnements non immersifs</i>	15
2.3.3	<i>Les environnements hybrides</i>	16
2.3.4	<i>Synthèse</i>	17
2.4	Les interfaces de RV	17
2.4.1	<i>Les traqueurs</i>	18
2.4.2	<i>Les gants de données</i>	21
2.4.3	<i>Les interfaces à retour d'effort</i>	22
2.4.4	<i>Synthèse</i>	25
2.5	Les techniques d'interaction en Environnement Virtuel	25
2.5.1	<i>Contrôle d'application</i>	26
2.5.2	<i>Navigation</i>	27
2.5.3	<i>Sélection/Manipulation d'objets</i>	29
2.5.4	<i>Synthèse</i>	34
2.6	Domaines d'applications de la RV	34
2.7	Conclusion.....	36
3	La Réalité Virtuelle et l'Evaluation de produits.....	38
3.1	L'innovation.....	38
3.2	Les produits innovants	39
3.3	La conception	39
3.3.1	<i>Le processus de conception</i>	39
3.4	Problématiques de la conception de produits	42
3.4.1	<i>L'évaluation de produits</i>	43
3.4.2	<i>La prise de décision</i>	44
3.4.3	<i>Les représentations intermédiaires traditionnelles</i>	45
3.4.3.1	Le dessin.....	47
3.4.3.2	La maquette physique.....	48
3.4.3.3	Le prototype physique	49
3.4.3.4	La maquette numérique	51
3.4.4	<i>Les limitations des représentations traditionnelles</i>	53
3.4.5	<i>Synthèse</i>	54
3.5	La RV en conception de produits	54
3.5.1	<i>Les représentations intermédiaires virtuelles</i>	58
3.5.1.1	La maquette virtuelle.....	59
3.5.1.2	Le prototype virtuel	60
3.5.2	<i>Utilisations des représentations de produits dans l'industrie</i>	62
3.5.3	<i>Synthèse</i>	64

3.6	Les limitations de la RV en conception	64
3.7	Conclusion.....	66
4	Expérimentations	68
4.1	Contexte industriel et scientifique.....	68
4.1.1	<i>L'entreprise ROSSIGNOL S.A.</i>	68
4.1.2	<i>L'approche</i>	69
4.1.3	<i>Hypothèses de recherche</i>	69
4.2	Expérimentation 1 "Maquette Physique / Maquette Virtuelle"	71
4.2.1	<i>Contexte et Objectifs</i>	71
4.2.2	<i>Participants</i>	72
4.2.3	<i>Dispositifs Expérimentaux</i>	72
4.2.4	<i>Procédure</i>	73
4.2.5	<i>Données collectées</i>	74
4.2.6	<i>Résultats</i>	74
4.2.7	<i>Analyse des résultats</i>	76
4.2.8	<i>Conclusion</i>	77
4.3	Expérimentation 2 "Influences des Avatars"	78
4.3.1	<i>Contexte</i>	78
4.3.2	<i>Les Avatars</i>	78
4.3.2.1	Qu'est ce qu'un avatar ?.....	78
4.3.2.2	Apparences et utilisations des avatars	80
4.3.2.3	Domaines d'influence des avatars	81
4.3.2.4	Synthèse	88
4.3.3	<i>Introduction</i>	88
4.3.4	<i>Expériences</i>	90
4.3.4.1	Expérience 1 : Influence de l'indication visuelle de direction des avatars sur la sélection d'un objet virtuel.....	90
4.3.4.1.1	Participants	90
4.3.4.1.2	Dispositifs Expérimentaux	91
4.3.4.1.3	Procédure.....	92
4.3.4.1.4	Conditions	93
4.3.4.1.5	Données collectées	94
4.3.4.1.6	Résultats	94
4.3.4.1.7	Analyse des résultats	95
4.3.4.1.8	Conclusion.....	95
4.3.4.2	Expérience 2 : Répétition de l'Expérience 1 avec plus d'avatars, parmi lesquels des avatars anthropomorphiques	96
4.3.4.2.1	Participants	96
4.3.4.2.2	Dispositifs Expérimentaux	96
4.3.4.2.3	Procédure.....	96
4.3.4.2.4	Conditions	96
4.3.4.2.5	Données collectées	97
4.3.4.2.6	Résultats	97
4.3.4.2.7	Analyse des résultats	98
4.3.4.2.8	Conclusion.....	99
4.3.4.3	Expérience 3 : Influence de l'indication visuelle de direction des avatars sur la manipulation d'une interface réelle d'interaction.....	99
4.3.4.3.1	Participants	100

4.3.4.3.2	Dispositifs Expérimentaux et Procédure	100
4.3.4.3.3	Conditions	100
4.3.4.3.4	Données collectées	101
4.3.4.3.5	Résultats	101
4.3.4.3.6	Analyse des résultats	105
4.3.4.3.7	Conclusion.....	105
4.3.5	<i>Synthèse</i>	105
4.3.6	<i>Conclusion</i>	107
4.4	Expérimentation 3 "Prototype Physique/ Prototype Virtuel"	109
4.4.1	<i>Contexte</i>	109
4.4.2	<i>Introduction</i>	109
4.4.3	<i>Participants</i>	111
4.4.4	<i>Dispositifs Expérimentaux</i>	111
4.4.5	<i>Procédure</i>	112
4.4.6	<i>Données collectées</i>	114
4.4.7	<i>Résultats</i>	114
4.4.8	<i>Analyse des résultats</i>	116
4.4.9	<i>Conclusion</i>	117
5	Expérimentation 4 "Le Produit Concept Virtuel (PCV)"	119
5.1	Contexte	119
5.2	Introduction	119
5.3	Objectifs	121
5.4	Participants	122
5.5	Protocole de réalisation et d'évaluation du PCV	122
5.6	Description du PCV	123
5.6.1	<i>Virtualisation des fonctionnalités du collecteur</i>	123
5.6.2	<i>Aide logicielle comportementale (ALC)</i>	127
5.7	Données collectées	128
5.8	Résultats	129
5.9	Conclusion.....	131
6	Synthèse et Apports.....	133
7	Conclusion et Perspectives.....	137
	Bibliographie.....	142
	Glossaire des abréviations	152
	Annexes	154

1 Introduction

1.1 Positionnement et Objectifs

L'innovation est devenue incontournable pour les entreprises et en particulier pour les PME (Petite ou Moyenne Entreprise). Elle s'inscrit dans un contexte de renouvellement des produits industriels de plus en plus fréquent, avec un temps de conception de plus en plus réduit [163]. Dans le processus de conception d'un produit manufacturé, les phases de validation des solutions sont des étapes fondamentales [170]. Il est indispensable de vérifier que le produit est conforme aux spécifications du cahier des charges, au moyen de tests effectués durant les premières phases de conceptualisation du processus de conception. Ces phases sont identifiées comme étant très importantes, car les décisions prises durant ces phases peuvent faire gagner ou perdre beaucoup de temps et d'argent. Selon le degré de satisfaction atteint, le produit est soit validé, soit amélioré ou complètement modifié. Ces tests sont nécessaires pour évaluer les différents aspects du produit. Cependant, selon Vélez [195], ils interviennent tardivement dans le processus de conception, ce qui entraîne parfois des modifications coûteuses et un allongement du temps de mise sur le marché. Il est donc souhaitable de pouvoir évaluer dès les phases amont de conception, les caractéristiques et fonctionnalités du futur produit.

Le premier Falcon 7X de Dassault (Figure N° 1) est entré en service sur la piste du Bourget le 14 juin 2007. Ce jet est le premier avion presque entièrement développé sur une plate-forme virtuelle. Dassault a ainsi réussi à diminuer de moitié les délais d'assemblage de son avion d'affaires. C'est le plus grand succès jamais réalisé à l'occasion du lancement d'un nouvel avion d'affaires (plus de 165 avions ont été commandés à ce jour). L'exemple du Falcon 7X montre bien l'importance de la RV en conception de produits.

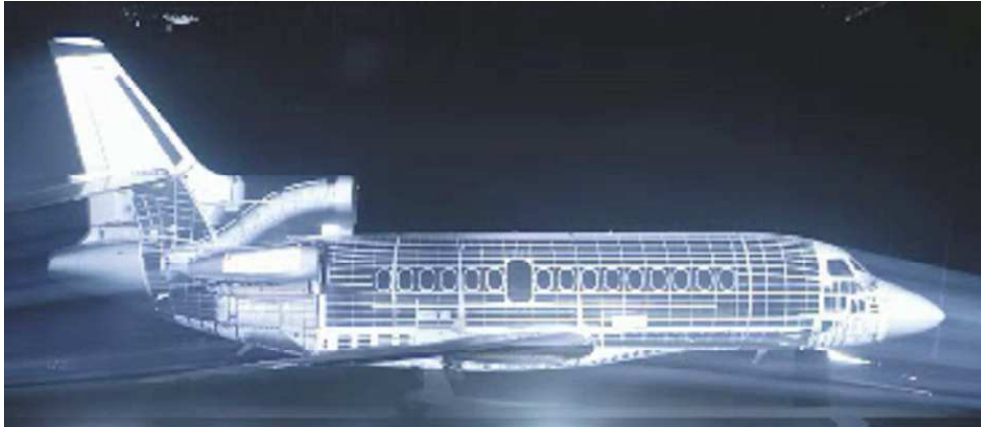


Figure N° 1. Falcon 7X (Dassault)

Cette thèse porte sur les représentations intermédiaires du produit, lors des premières phases du processus de conception. L'accent est mis sur l'utilisation des technologies de la Réalité Virtuelle (RV). Un proverbe bien connu nous dit que "une image en dit plus que mille mots". Cela est vrai dans beaucoup de domaines et en particulier dans celui qui nous intéresse, la conception de produits. La représentation du produit est vitale pour les différents acteurs (ingénieurs, concepteurs, ergonomes, chef de projet, ...) du processus de conception d'un nouveau produit. Ils ont besoin d'évaluer les différents aspects, ainsi que la faisabilité du futur produit. Traditionnellement, cette évaluation est réalisée après la validation des concepts, à l'aide de représentations physiques, telles que la maquette ou le prototype physique. Aujourd'hui, la RV permet de réaliser des représentations intermédiaires virtuelles, telles que la maquette ou le prototype virtuel. Pourquoi alors ne pas travailler essentiellement avec ces représentations virtuelles pour économiser du temps et de l'argent, même dans le cadre d'une PME ? C'est la tendance actuelle poussée par le développement de la Chaîne Numérique de la Conception [157].

Dans cette thèse, nous menons entre autres, une étude comparative des représentations intermédiaires virtuelles et des représentations intermédiaires physiques, pour l'évaluation de produits lors des phases amonts du processus de conception (Figure N° 2). Ces phases amonts se situent après les phases préliminaires où le besoin est défini et avant les phases aval de production et de commercialisation du futur produit [57, 116].

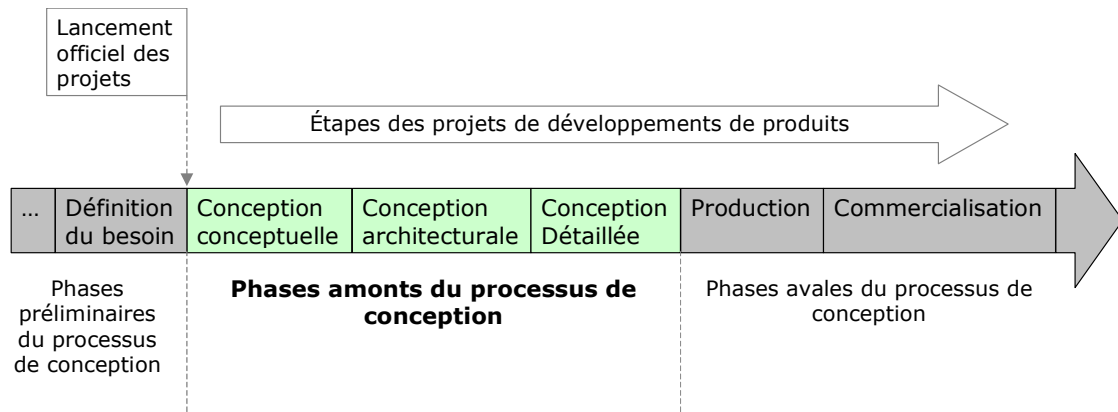


Figure N° 2. Phases amonts du processus de conception

L'objectif de notre recherche est d'étudier l'utilisation de la RV, et plus particulièrement des représentations intermédiaires virtuelles, comme outil d'évaluation du futur produit, par rapport aux outils traditionnels. Notre étude explore ainsi les enjeux des représentations virtuelles en conception de produits. Nous tentons ainsi de savoir si les représentations virtuelles sont substituables ou complémentaires aux représentations traditionnelles telles que la maquette ou le prototype physique, pour l'évaluation de produits.

1.2 Organisation du document

Le document s'organise en sept parties. La **première** partie est une introduction, qui précise les objectifs et les hypothèses de notre recherche. La **seconde** partie présente les environnements, les interfaces, les techniques d'interactions et les avatars, utilisés pour les applications de la RV dans différents domaines, dont la conception de produits. La **troisième** partie se concentre sur l'utilisation de la RV et plus particulièrement des représentations intermédiaires virtuelles, pour l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception. La **quatrième** partie présente les 3 premières expérimentations réalisées pour vérifier nos 3 premières hypothèses de recherche. Dans la **cinquième** partie, nous proposons une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle. La **sixième** partie du document présente la synthèse des apports de la thèse et la **septième** partie conclut la thèse et apporte les perspectives de nos recherches.

2 La Réalité Virtuelle (RV)

2.1 Définition de la RV

Qu'est ce que la RV ? Pour le grand public, la RV s'apparente aux jeux vidéo. Lorsqu'il est demandé de définir la RV, la majorité des personnes interrogées listent les équipements techniques utilisés dans une application de RV. Rares sont ceux qui parlent des objectifs et utilisations de la RV. Voilà maintenant plus de quinze ans que des recherches sont menées dans le domaine de la RV et il existe plusieurs définitions de la RV. Selon le champ d'application, la définition de la RV est orientée vers un aspect spécifique tel que la présence, l'interaction, la navigation, la visualisation, etc. Nous donnons ci-dessous quelques-unes des définitions les plus répandus :

"La RV est une simulation informatique hautement interactive, qui détecte la position du participant et lui renvoie un retour sensoriel sur un ou plusieurs sens, donnant ainsi un sentiment d'immersion ou de présence dans la simulation" [177].

"La réalité virtuelle est une simulation informatique interactive et immersive d'environnements 3D réels ou imaginaires" [202].

"La RV est l'utilisation d'un ordinateur et d'une interface homme-machine pour créer un monde 3D contenant des objets interactifs, permettant un fort sentiment de présence" [32].

"La réalité virtuelle se réfère aux environnements tridimensionnels générés par ordinateurs, immersifs, interactifs, multisensoriels et centrés sur l'utilisateur, ainsi qu'à la combinaison des technologies requises pour construire ces environnements" [51].

"La RV est une expérience d'immersion dans laquelle les utilisateurs portent des casques-écrans munis de capteurs de position, voient des images stéréoscopiques, entendent un son 3D, et peuvent explorer un monde interactif en trois dimensions" [148].

Zeltzer [209] a schématisé la réalité virtuelle par un cube qui montre ses composants de base (Figure N° 3).

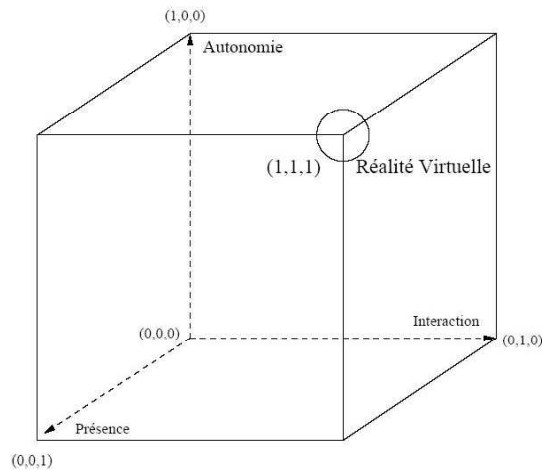


Figure N° 3. Cube de Zeltzer

Burdea [34] a remplacé l'autonomie de Zeltzer par l'imagination et la présence par l'immersion dans sa représentation de la réalité virtuelle. Pour lui, les applications de la réalité virtuelle utilisent la créativité humaine, qui est basée sur l'imagination (Figure N° 4).

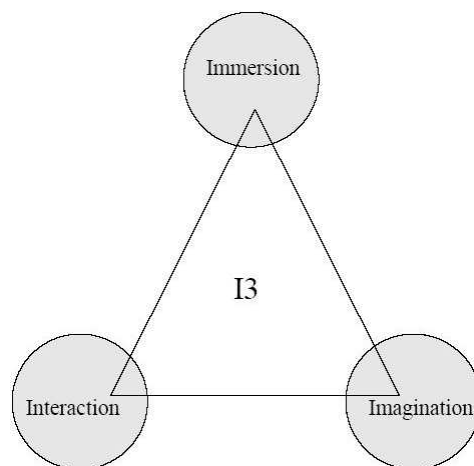


Figure N° 4. Les trois I (I^3)

Dans ces définitions, la RV est définie par quelques mots clefs tels que "simulation informatique, immersion, interaction et retour sensoriel". Selon la définition, certains mots clefs sont privilégiés, cependant toutes les définitions s'accordent sur le fait que la RV est la simulation informatique d'un objet et/ou d'un environnement. Cet objet est créé et présenté de manière à ce que l'utilisateur puisse l'observer tout en étant immergé dans l'environnement simulé. En ajoutant différentes interfaces d'entrée et de sortie, l'utilisateur peut interagir avec les objets de l'Environnement Virtuel (EV), par exemple avec la voix, le mouvement ou le touché.

Pour Ellis [69] l'immersion physique est un concept-charnière de la RV, qui passe nécessairement par une tentative de recréer le monde réel.

"La RV est une interface homme-machine avancée qui simule un environnement réaliste et permet aux utilisateurs d'interagir avec celui-ci".

De cette définition émerge un terme qui nécessite une attention particulière, celui d'environnement réaliste. Une tendance générale considère la RV comme une imitation de la réalité physique, l'accent étant mis sur une sorte de mimétisme de l'environnement physique grâce aux technologies de la 3D. Bien que les progrès de la technologie informatique améliorent jour après jour le réalisme des EV, il est encore inconcevable de penser que la RV puisse se substituer au réel. Pour Perraya [143], un degré de réalisme "parfait" n'est pas forcément un aboutissement, l'information contenue dans un environnement est souvent bien plus importante que son esthétisme. Par contre la richesse de la RV réside dans les potentialités qu'elle seule peut offrir. Ainsi elle permet des actions et gestes qui seraient impossibles à réaliser dans la vie réelle. Le psychologue John Ph. Suller compare la RV à un monde de rêveurs [185]. Comme le rappellent Fuchs et al. [76], la RV, contrairement à la simulation qui représente des phénomènes physiques réels, permet d'aller au-delà du réel : son application à la visualisation scientifique en est un exemple (étude de la structure d'une molécule ou de la radioactivité), de même que la collaboration à distance.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'utilisation de la RV en conception de produits et plus particulièrement pour l'évaluation de produits. Quelles sont les différences avec les méthodes traditionnelles ? Quels en sont les effets ? Pourquoi un tel engouement pour la RV ?

La définition de la RV adoptée, dans le cadre de notre recherche est celle de Fuchs et al. [76] :

"La réalité virtuelle est une technologie qui permet à une ou à plusieurs personnes des activités sensori-motrices et donc mentales dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit une simulation de certains aspects du monde réel".

Ce qui est important de retenir est que la RV est une simulation 3D en temps réel. Elle doit être considérée comme un outil qui en conception de produits, permet à l'utilisateur d'évaluer des produits virtuels interactifs et non pas des images de produits.

2.2 Historique de la RV

Un bref retour en arrière dans l'histoire de la réalité virtuelle, nous permet d'identifier ses objectifs initiaux et de comprendre le contexte et les raisons pour lesquels la réalité virtuelle est utilisée dans le domaine de la conception de produits.

Lorsque le scientifique britannique Charles Wheatstone [142] a inventé le premier stéréoscope en 1838, l'homme a pu pour la première fois voir de simples photos en stéréoscopie.

Le premier simulateur de vol a été développé en 1940. Quelques années plus tard en 1943, l'armée des États Unis a commencé la conception du premier ordinateur complètement électronique ENIAC (Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer) [89]. Cependant, à ce moment là, personne ne pensait à utiliser les ordinateurs pour autre chose que la résolution de problèmes mathématiques.

En 1957, Morton Heilig [130] a inventé le Sensorama (Figure N° 5). Ce dispositif constitue l'adaptation individualisée d'un concept plus large, breveté sous l'appellation "The Experience Theater", dont le propos est de donner à ceux qui assistent aux représentations l'illusion complète de la réalité, par l'introduction d'un écran remplissant la totalité du champ visuel et par une stimulation sensorielle plus large, incluant des sons stéréophoniques, des odeurs ainsi que des sensations de température et de mouvement. Le Sensorama simulait une randonnée à motocyclette dans les rues de New York (Annexe N° 1).



Figure N° 5. Le Sensorama

Le premier système de CAO a été présenté au début des années soixante. Mais la CAO ne connut son essor qu'à partir de 1975, lorsque le coût de mise en place d'un poste se rapprocha du coût annuel d'un dessinateur. On s'est aperçu à cette occasion que statistiquement près de 10% des cotations sur les plans existants étaient inexactes, que des références de plans existaient en double, qu'une référence unique pouvait correspondre à plusieurs plans légèrement différents, etc. Au bout du compte, le gain de fiabilité de l'information se révéla constituer un argument supplémentaire important décidant à généraliser la CAO.

En 1965, Ivan Sutherland [186], considéré comme le père de l'informatique graphique, a proposé ce qu'il nomme "The Ultimate Display". C'est un écran en forme de fenêtre donnant accès à un monde virtuel où l'on n'est pas obligé de suivre les lois physiques imposées dans le monde réel. *"Avec une programmation adéquate, un tel écran pourrait littéralement donner accès au Pays des merveilles visité par Alice"*.

En 1968, Sutherland a réalisé le premier visiocasque stéréoscopique (Figure N° 6). Ce dispositif est composé de deux écrans placés devant les yeux, permettant une immersion stéréoscopique. Lorsque l'utilisateur bouge la tête, l'ordinateur recalcule les images projetées sur chaque œil, donnant ainsi l'impression d'une exploration d'un environnement fixe.

Cependant, c'était un dispositif primitif, tant du point de vue interface que réalisme. Ce visiocasque était si lourd qu'il devait être suspendu au plafond, ce qui a inspiré son appellation "l'épée Damoclès".

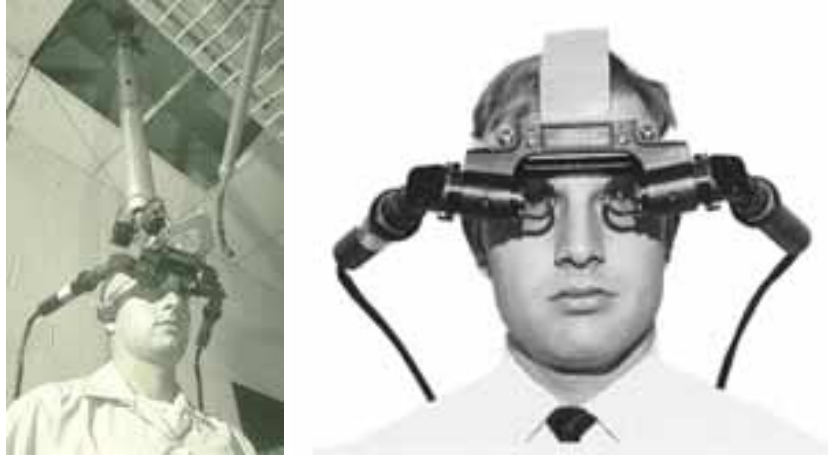


Figure N° 6. Head-Mounted Display (HMD)

Plus tard, en 1970, Myron Krueger [109] a conçu un système fournissant un degré assez élevé d'interaction. Ce système baptisé Videoplace, crée un environnement qui répond aux mouvements des participants. Krueger a utilisé un grand écran en face de l'utilisateur. Sur cet écran, l'ombre de l'utilisateur est affichée (Figure N° 7). Il est également possible d'afficher plusieurs personnes sur le même écran. Un utilisateur peut ainsi toucher les silhouettes représentant d'autres utilisateurs et peut aussi manipuler les objets graphiques et animés qui apparaissent sur l'écran.

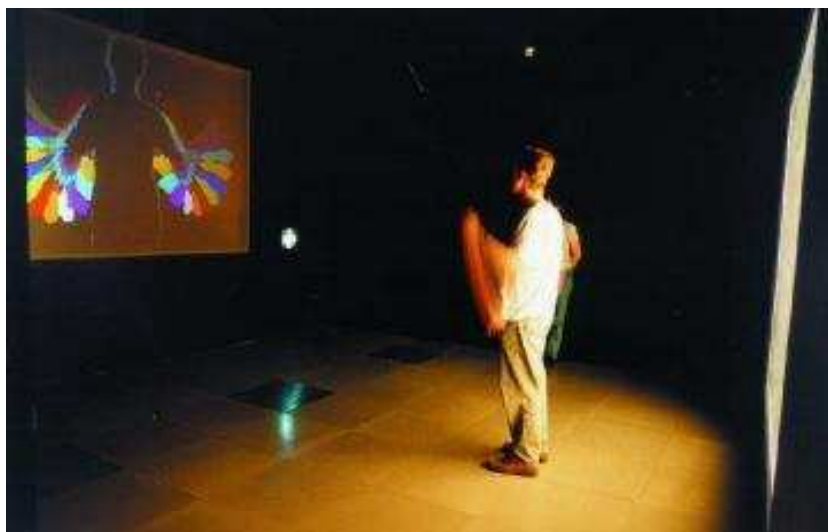


Figure N° 7. Le Videoplace

En 1984, des scientifiques de la NASA ont développé le premier visiocasque HMD commercial qui a ouvert la voie à la commercialisation de produits dédiés à la réalité virtuelle.

C'est en 1986 que Jaron Lanier a employé pour la première fois le terme de "réalité virtuelle" qu'il définit comme étant une réalité synthétisée partageable avec d'autres personnes, que nous pouvons appréhender par nos sens, et avec laquelle nous pouvons interagir, le tout par l'intermédiaire d'une interface:

"We are speaking about a technology that uses computerised clothing to synthesise shared reality. It recreates our relationship with the physical world in a new plane, no more, no less. It doesn't affect the subjective world; it doesn't have anything to do directly with what's going on inside your brain. It only has to do with what your sense organs perceive."

Le terme RV est le plus couramment employé dans la littérature, mais d'autres néologismes sont apparus depuis 1986 en raison du développement de l'informatique et de la pluridisciplinarité de ce domaine de recherche. Ainsi, plusieurs auteurs ont proposé des expressions alternatives à celle de Lanier. Cadoz [37] parle plutôt de "réalité intégrale", le qualificatif d'intégral exprimant ici que la représentation se manifeste à la totalité de nos sens coordonnés (visuel, auditif, tactile, etc.). Kruegger [108], un des pionniers de la RV, a proposé le terme de "réalités artificielles" car pour lui "La promesse des réalités artificielles n'est pas de reproduire la réalité conventionnelle ou d'agir sur le monde réel. Pour lui, elle est précisément l'opportunité de créer des réalités synthétiques pour lesquelles il n'y a pas d'antécédents réels". Quant à Fuchs [76], il a proposé le terme de "réalité vicariante", le terme "vicariante" étant utilisé en physiologie pour désigner un organe qui se supplée à un autre.

Dans une certaine mesure, la RV a été utilisée avec succès pour la visualisation scientifique, la simulation de vol, la téléprésence, l'entraînement, l'éducation, la médecine, le divertissement, la construction et plus récemment pour la conception de produits [10, 15, 207]. Selon Kan et al. [103], la RV est un bon outil d'aide à la conception de produits. La RV permet au concepteur de percevoir l'écran de l'ordinateur comme une fenêtre sur un monde virtuel, et non comme une table à dessin évoluée. Elle se présente comme une évolution de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

2.3 Les environnements de RV

En conception de produits, l'évaluation visuelle des caractéristiques du futur produit est indispensable. Pour l'évaluation d'une représentation intermédiaire virtuelle, il est nécessaire de visualiser celle-ci à l'aide d'un environnement de réalité virtuelle. Encore faut-il choisir le bon environnement de visualisation en fonction de ses besoins.

Il existe de nombreux environnements de RV, allant de l'écran d'ordinateur classique jusqu'au visiocasque. Ces environnements peuvent toutefois être classés en trois catégories, selon leur degré d'immersion et d'interactivité. Ces trois groupes sont les environnements immersifs, les environnements non immersifs et les environnements hybrides (voir [76] pour une revue détaillée de ces environnements). Les environnements immersifs tentent de couper l'utilisateur du monde réel en remplaçant en partie ou en totalité, sa vision du monde réel par le monde virtuel généré par l'ordinateur. Les environnements non immersifs laissent l'utilisateur dans le monde réel, tout en lui permettant de visualiser le monde virtuel au travers d'un dispositif d'affichage tel qu'un écran d'ordinateur. Les environnements hybrides permettent de superposer le monde virtuel sur la vision du monde réel. Ces dispositifs sont aussi connus sous le nom de dispositifs de "réalité augmentée" (RA). Un exemple bien connu est le casque utilisé par les pilotes d'avions de chasses [196].

2.3.1 Les environnements immersifs

Les environnements immersifs occupent en partie ou totalement le champ visuel de l'utilisateur afin d'augmenter son immersion, ainsi que son sentiment de présence dans le monde virtuel.

Les plans de travail virtuels ou workbenches ont une forme qui les prédispose à la manipulation d'objets, comme on le ferait sur un plan de travail réel. Ces plans de travail virtuels fonctionnent comme des écrans stéréoscopiques avec l'utilisation de lunettes adaptées. La stéréoscopie peut être active ou passive et l'environnement virtuel peut être projeté sur un ou deux écrans (Figure N° 8).



Figure N° 8. Plans de travail [9]

La Visionstation d'Elumens [70] est un plan de travail virtuel projetant l'image sur une surface sphérique devant l'utilisateur (Figure N° 9). Le principal avantage de cette configuration est de proposer une surface de projection enveloppante, favorisant le sentiment d'immersion visuelle, évitant ainsi les phénomènes d'inter-réflexion à la jonction entre plusieurs écrans.



Figure N° 9. La VisionStation

Les visiocubes, tels que le CAVE™ [51] ou le SAS3 [131], représentent probablement les plus connues des solutions à base de projection sur grands écrans. Ce sont aussi les plus chères et les plus lourdes à mettre en oeuvre et à maintenir. Ils se présentent sous la forme d'une pièce cubique possédant de quatre à six faces, ce qui procure une excellente sensation d'immersion (Figure N° 10 et Figure N° 11). Ce type de système permet d'immerger un utilisateur dans un environnement à l'échelle 1.

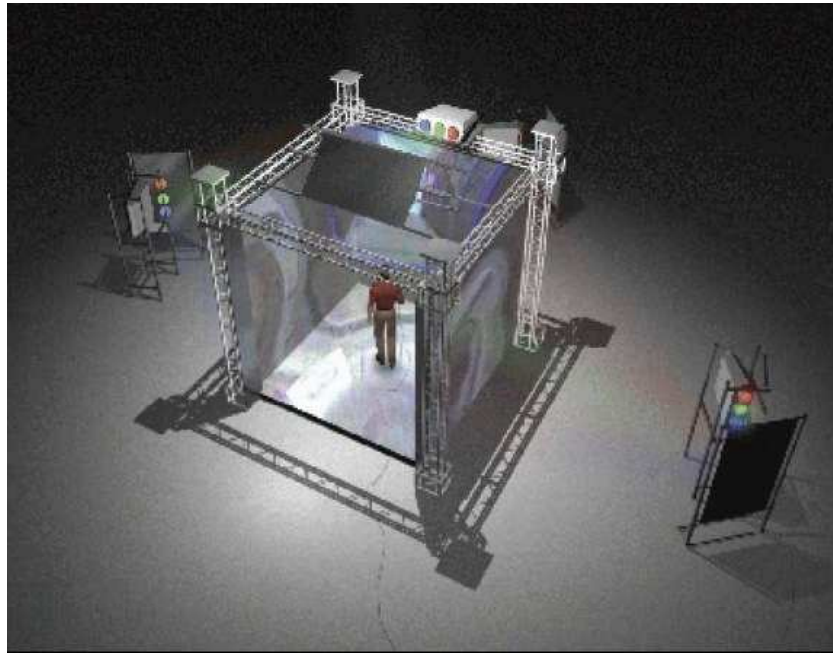


Figure N° 10. Le SAS Cube de CLARTE [131]

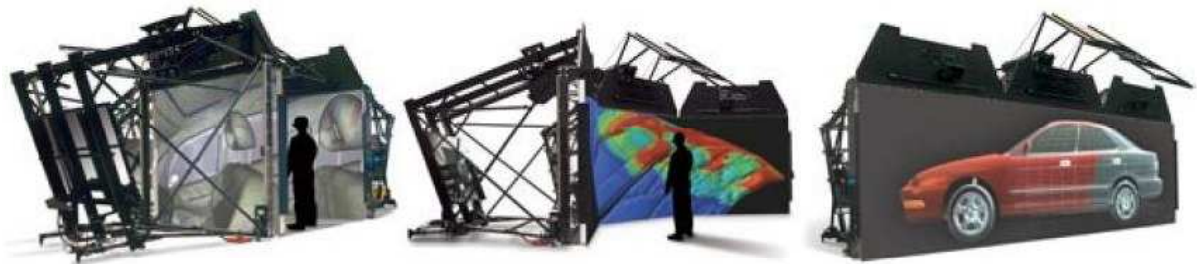


Figure N° 11. Le MoVE [9]

Les salles immersives sont généralement utilisées pour projeter un environnement virtuel à grande échelle. L'avantage de ces salles est qu'elles permettent à plusieurs utilisateurs de visualiser simultanément le même environnement virtuel (Figure N° 12 et Figure N° 13). Le principal avantage de ces configurations tient à leur taille, qui permet

l'observation par exemple des objets de grandes dimensions tels que des bâtiments. En contre partie, il est difficile d'obtenir un affichage à la fois rapide et de très bonne qualité.



Figure N° 12. Reality Center de SGI [174]

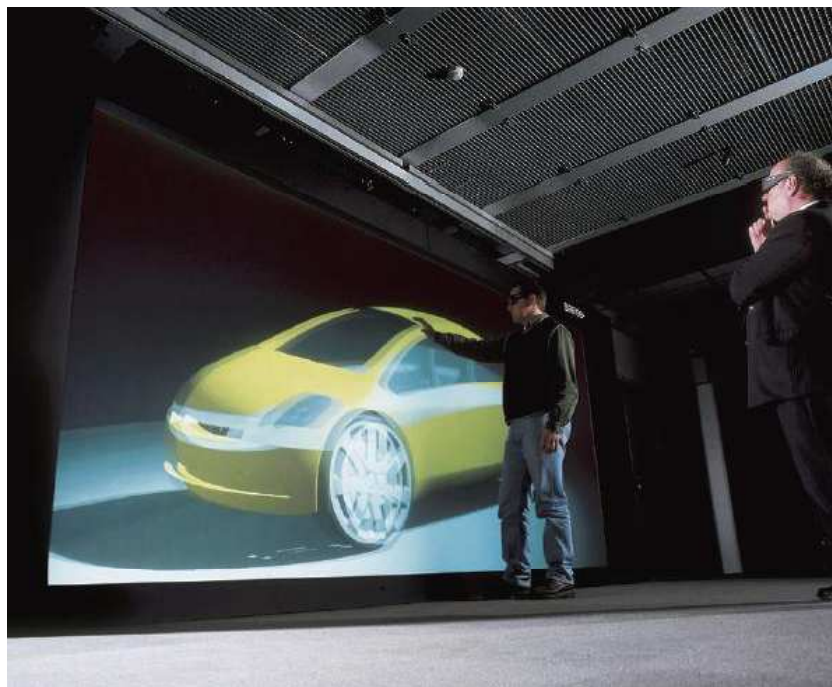


Figure N° 13. CADWall de Barco [9]

Les visiocasques, permettent de traverser la limite de l'écran pour interagir directement avec différentes formes d'information dans un environnement d'inclusion [31]. Le visiocasque permet une immersion visuelle totale de l'utilisateur. Néanmoins, plusieurs

problèmes se posent lors de son utilisation. Le premier problème est que le câble qui relie le visiocasque à l'ordinateur restreint la mobilité de l'utilisateur. Le second problème concerne le poids élevé du visiocasque, qui empêche une utilisation prolongée. Enfin, le troisième problème et souvent le plus contraignant, concerne la fréquence de rafraîchissement des images. Les visiocasques actuels ont une fréquence de rafraîchissement trop faible, ce qui crée chez l'utilisateur un malaise similaire à celui du mal de mer.

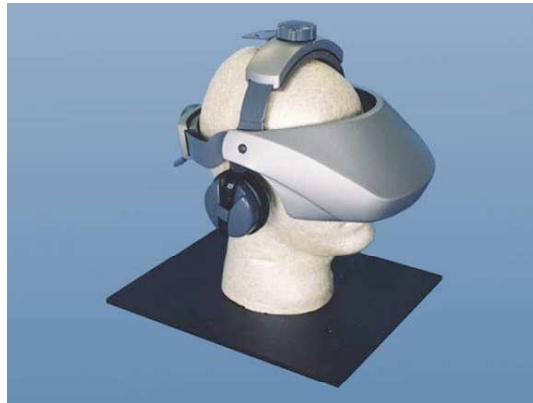


Figure N° 14. Visiocasque 5DT HMD 800 [1]

2.3.2 Les environnements non immersifs

Comme son nom l'indique, un environnement non immersif est un système qui n'offre rien de particulier pour renforcer visuellement l'immersion de l'utilisateur. Un tel système peut utiliser par exemple un ordinateur standard et l'environnement virtuel est vu à travers un écran classique d'ordinateur. Ces environnements sont aussi appelés WOW "Window On a World" [91]. L'interaction avec un tel environnement peut se faire par des moyens conventionnels tels qu'un clavier, une souris ou même en utilisant des dispositifs 3D plus élaborés comme une SpaceBall, un gant de données ou un bras à retour d'effort. L'avantage d'un environnement non immersif est qu'il n'exige pas de matériels spécifiques, par conséquent un tel environnement peut être implémenté sur un ordinateur standard. Les environnements non immersifs se présentent comme une alternative plus accessible que les environnements immersifs. L'utilisation de matériel très évolué comme le visiocasque est souvent associée à l'immersion. Cependant, la sensation de présence dans un monde virtuel peut être vécue simplement avec une station de travail conventionnelle (un écran, un clavier et une souris) [158]. Sur un écran classique, la scène virtuelle est affichée avec les mêmes caractéristiques de profondeur, de perspective, de couleur, de texture, d'éclairage et d'ombrage que dans un visiocasque. L'interaction est contrôlée par les réponses du système aux actions de

l'utilisateur. Dans les environnements non immersifs, l'écran de l'ordinateur devient une fenêtre vers un monde virtuel.

2.3.3 Les environnements hybrides

Les environnements hybrides permettent de faire coexister le monde réel et le monde virtuel en les superposant. L'utilisateur perçoit à la fois les informations du monde réel et celles du monde virtuel sous différentes formes (texte, objet 3D,...). Néanmoins, il est nécessaire de s'assurer qu'à chaque instant, la superposition du réel et du virtuel est correcte. Cette superposition est souvent assurée par un visiocasque à écrans semi-réfléchissants (Figure N° 15), mais il existe d'autres dispositifs reposant sur le même principe (Figure N° 16).

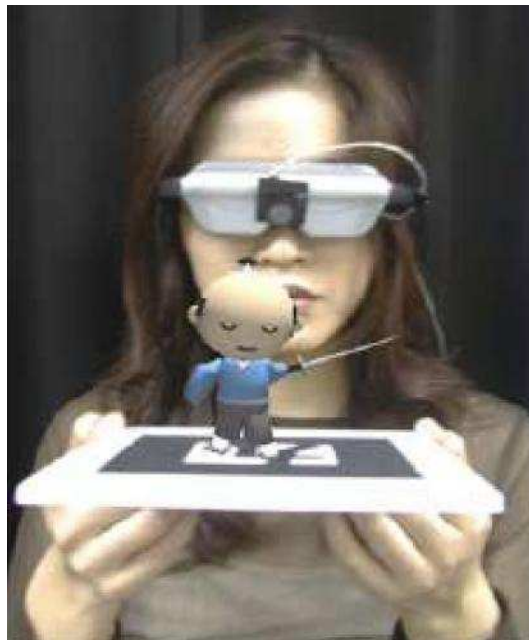


Figure N° 15. Visiocasque à écrans semi-réfléchissants [104]



Figure N° 16. La fenêtre de réalité augmentée MEDARPA [200]

2.3.4 Synthèse

Le tableau suivant présente une synthèse des environnements de RV présentés précédemment.

Environnement	Avantage	Inconvénient
Immersifs	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion - Présence - Espace de travail (échelle 1) - Multi-utilisateurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix - Encombrement
Non immersifs	<ul style="list-style-type: none"> - Prix - Encombrement - Mobilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion - Mono utilisateur
Hybrides	<ul style="list-style-type: none"> - Coexistence du monde réel et du monde virtuel 	<ul style="list-style-type: none"> - Synchronisation du rendu réel/virtuel - Prix - Mono utilisateur

Tableau N° 1. Synthèse des environnements de RV

2.4 Les interfaces de RV

En conception de produits, l'évaluation multisensorielle des caractéristiques et fonctionnalités du futur produit nécessite de pouvoir interagir avec celui-ci. En réalité virtuelle, cette interactivité est nécessaire pour que l'utilisateur puisse agir sur l'EV et ressentir les effets de ses actions. Pour Burdea, l'interaction temps réel multimodale qui implique l'utilisateur à travers tous ses sens est un point clé de la RV [34]. On retrouve cette

composante dans la plupart des définitions de la réalité virtuelle [32, 148, 177]. Cette interactivité est donc indispensable à l'évaluation multisensorielle d'une représentation intermédiaire virtuelle. En outre, celle-ci requière l'utilisation d'interfaces de réalité virtuelle. Le choix de l'interface de RV est très important car il conditionne la manière dont l'utilisateur interagie avec la représentation virtuelle.

Les interfaces de RV sont diverses et variées, allant de la souris d'ordinateur jusqu'au bras à retour d'effort. Nous allons décrire dans la suite du document, trois catégories d'interfaces de RV parmi les plus utilisées, les traqueurs de position, les gants de données et les interfaces à retour d'effort (voir [76] pour une revue détaillée de ces interfaces).

2.4.1 Les traqueurs

Pour générer des EV tenant compte des mouvements du corps de l'utilisateur, il faut pouvoir obtenir très rapidement les positions du corps dans l'espace 3D et les transmettre à l'ordinateur. Cela peut être réalisé à l'aide de traqueurs qui servent à repérer la position et/ou l'orientation de points dans l'espace. Les traqueurs couramment utilisés reposent principalement sur quatre technologies, mécanique, optique, magnétique et acoustique.

Les traqueurs mécaniques utilisent une armature mécanique pour traquer la position et l'orientation de l'utilisateur (Figure N° 17). Les traqueurs mécaniques ont l'avantage d'être très précis et rapides, ils peuvent réaliser jusqu'à trois cents mesures à la seconde. Cependant, ils ont l'inconvénient d'être encombrants et de limiter les mouvements de l'utilisateur.



Figure N° 17. Full Body Tracker d'X-IST Realtime Technologies [204]

Les traqueurs optiques utilisent de petits marqueurs réfléchissants et au minimum deux caméras. Les marqueurs sont placés sur le corps de l'utilisateur et les caméras sont placées autour, de façon à toujours avoir tous les marqueurs dans le champs de vision des caméras (Figure N° 18). Les avantages des traqueurs optiques sont une bonne précision des mesures et une totale liberté de mouvement de l'utilisateur. Les principales limitations de ce système sont un espace de travail réduit et le temps nécessaire pour analyser les flux vidéo des différentes caméras, afin de déterminer la position 3D de chaque marqueur. Il peut aussi y avoir des problèmes d'obstruction entre émetteur et récepteur et des perturbations lumineuses.



Figure N° 18. Traqueur optique [198]

Les traqueurs électromagnétiques utilisent une source générant un champ magnétique et un capteur qui renvoie sa position et son orientation relative à la source du champ magnétique (Figure N° 19). Les traqueurs électromagnétiques présentent des performances correctes quant à la précision des mesures et permettent une bonne mobilité de l'utilisateur. Une limitation de ce système est que le champ magnétique peut être perturbé si des objets métalliques se trouvent à proximité, provoquant ainsi des erreurs dans la lecture des données. Cependant, les traqueurs électromagnétiques actuels sont assez robustes et largement utilisés pour traquer les mains de l'utilisateur.



Figure N° 19. Traqueur électromagnétique Fastrak [72]

Les traqueurs acoustiques utilisent des ultrasons pour trianguler une source dans l'espace de travail, ils sont composés de trois émetteurs d'ultrasons et d'un ensemble triangulaire de trois récepteurs liés à l'objet (Figure N° 20). Ce système permet une localisation spatiale correcte, mais son espace de travail est plus limité que celui des traqueurs électromagnétiques. De plus, il peut être perturbé par des surfaces acoustiquement réfléchissantes ou des bruits parasites. Il est aussi sensible à certains facteurs environnementaux tel que la température, la pression ou l'humidité.



Figure N° 20. Traqueur acoustique de Logitech [121]

2.4.2 Les gants de données

Les gants de données sont très liés à l'image de la RV auprès du grand public. En effet, la plupart des affiches publicitaires dont le sujet est la RV, représentent un utilisateur portant des gants de données et un visiocasque. Les gants de données permettent de déterminer la position et la flexion des doigts, définissant ainsi la forme de la main. Ils peuvent être utilisés pour générer des commandes ou pour pointer des objets, dans ce cas ils peuvent être considérés comme des curseurs évolués. Les gants de données permettent aussi d'effectuer des tâches de saisie d'objets virtuels. Les gants de données les plus courants sont à fibre optique, à effet hall ou à variation de résistance.

Les gants à fibre optique ont été les premiers inventés. A chaque doigt du gant sont fixés plusieurs fibres optiques. Celles-ci sont positionnées dans l'alignement des doigts et sont plus ou moins longues pour détecter les mouvements aux différentes articulations. La flexion des doigts est mesurée par la déformation des fibres optiques (Figure N° 21). Ce type de gants nécessite de faire attention à la position des fibres optiques qui peuvent bouger lors de l'utilisation du gant.



Figure N° 21. 5DT Data Glove 14 Ultra [1]

Les gants à effet hall tel que le Dextrous Hand Master de l'entreprise Sarcos [164] possèdent un exosquelette métallique porté sur le dos de la main (Figure N° 22). Une vingtaine de capteurs de position à effet Hall placés aux articulations permettent de mesurer avec une grande précision la rotation de chaque phalange. Le poids et l'encombrement sont les inconvénients les plus importants de ce type d'interface.

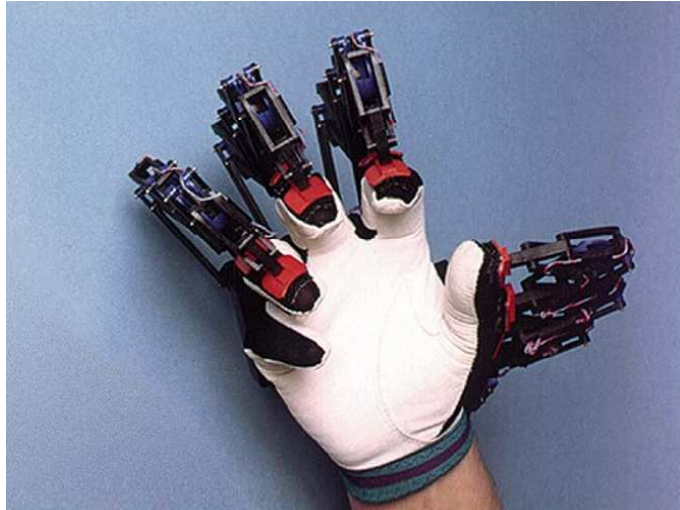


Figure N° 22. CyberGrasp [164]

Les gants à variation de résistance utilisent des jauges de contraintes fixées à un matériau élastique. Avec ce type de gant, la mesure des mouvements des doigts n'est pas précise (Figure N° 23).



Figure N° 23. CyberGlove [90]

2.4.3 Les interfaces à retour d'effort

La vue et l'ouïe sont des sens importants dans la vie de tous les jours. Cependant, il ne faut pas négliger le toucher qui est très important pour la manipulation d'objets dans le monde réel, comme dans le monde virtuel. Les interfaces à retour d'effort permettent d'appliquer à l'utilisateur des contraintes physiques générées par l'EV. Ces contraintes permettent souvent d'améliorer les performances et la qualité de l'interaction avec un EV [34]. Les principales interfaces à retour d'effort sont les bras à retour d'effort et les systèmes à câbles.

Les bras à retour d'efforts sont des systèmes initialement dérivés des bras maîtres utilisés en téléopération [82]. La société Haption [88] commercialise le VIRTUOSE 6D35-45 (Figure N° 24) qui possède un retour d'effort sur six axes. Il est particulièrement adapté aux opérations de manipulation d'objets virtuels, pour des applications d'analyse ergonomique, de montage/démontage, ou encore de formation à la maintenance. La société SensAble [172] est leader international des bras à retour d'effort. Elle produit le Phantom Omni (Figure N° 25) qui est aujourd'hui l'interface à retour d'effort la plus rentable et la plus répandue dans le milieu de la recherche.



Figure N° 24. Virtuouse 6D 35-45 [88]



Figure N° 25. Phantom Omni [172]

Les systèmes à câbles proposent de contraindre les mouvements de l'utilisateur à l'aide de câbles flexibles. A une extrémité, les câbles sont reliés à des moteurs fixés aux sommets d'une structure généralement cubique. De l'autre coté, les câbles sont attachés à un organe saisi par l'utilisateur. Ainsi, en contrôlant la tension appliquée par les moteurs sur les câbles, on contrôle les efforts transmis à l'utilisateur. Les dispositifs SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality) [166] permettent ainsi de simuler des tâches de saisie virtuelle à une ou deux mains (Figure N° 26 et Figure N° 27).

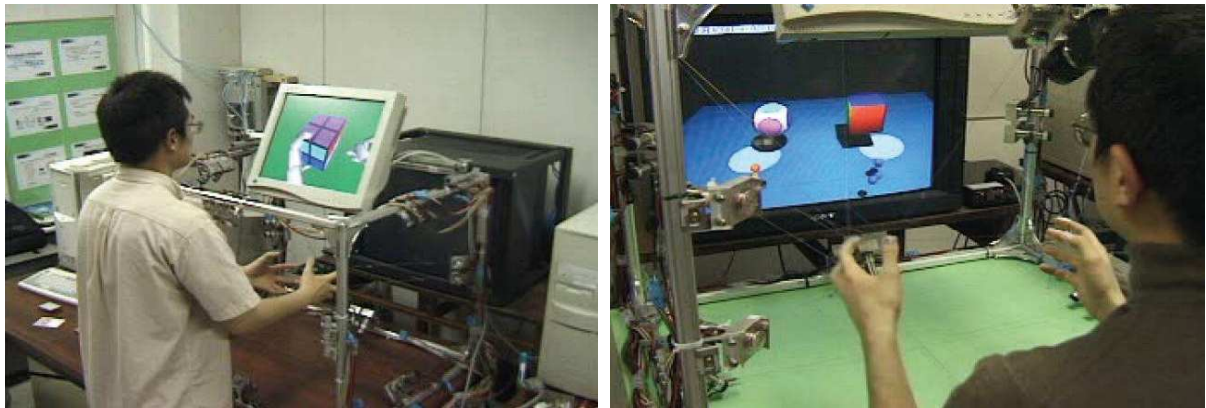


Figure N° 26. SPIDAR 8 [165]

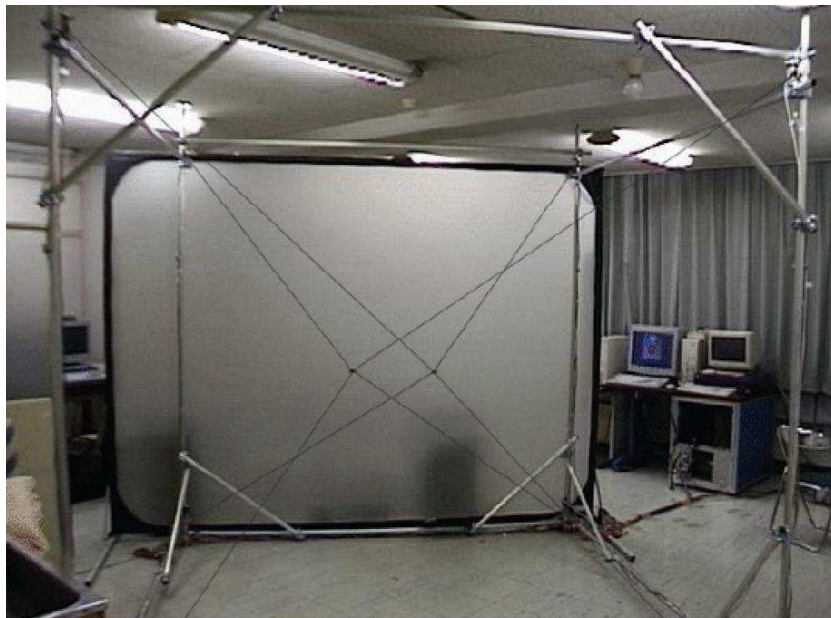


Figure N° 27. Big SPIDAR [21]

2.4.4 Synthèse

Le tableau suivant présente une synthèse des interfaces de RV présentées précédemment.

Traqueur	Avantage	Inconvénient
Mécaniques	- Précision	- Encombrement
Optiques	- Précision - Encombrement	- Espace de travail - Traitement vidéo - Obstruction caméra - Perturbations lumineuses
Magnétiques	- Précision - Encombrement - Robustesse	- Perturbations magnétiques
Acoustiques	- Précision	- Espace de travail - Perturbations acoustiques - Perturbations climatiques
Gant de données	Avantage	Inconvénient
A fibre optique	- Précision - Encombrement	- Ajustement de la fibre optique
A effet hall	- Précision	- Encombrement - Poids
A variation de résistance	- Encombrement	- Précision
Retour d'effort	Avantage	Inconvénient
Bras	- Précision - Robustesse	- Contact ponctuel - Espace de travail
Câbles	- Contact multipoints	- Précision - Robustesse

Tableau N° 2. Synthèse des interfaces de RV

2.5 Les techniques d'interaction en Environnement Virtuel

Nous avons vu dans le chapitre précédent que, l'évaluation multisensorielle d'une représentation virtuelle nécessite une interaction multimodale, permise par l'utilisation d'interfaces de réalité virtuelle. Nous avons aussi constaté que les interfaces existantes sont loin d'être parfaites. C'est pourquoi, il est souvent nécessaire d'utiliser des techniques d'interactions (TI), en complément des interfaces de RV. Des tâches apparemment aussi simples que la navigation ou la saisie et la manipulation d'un objet sont aujourd'hui encore

difficiles à réaliser en EV. Selon Coquillart [50], un des principaux problèmes de l'interaction homme-machine vient des interfaces de RV mises à disposition de l'utilisateur pour interagir avec l'ordinateur. Elle définit l'interaction 3D comme étant le couplage d'une interface matérielle et d'une technique d'interaction. Dans sa définition, la technique d'interaction décrit la manière d'exploiter le matériel. C'est une méthode, un scénario d'utilisation de l'interface matérielle, qui aide l'utilisateur à accomplir une tâche précise dans l'EV.

Bowman et al. [24, 27] classent les techniques d'interactions en quatre catégories, le contrôle d'application, la sélection, la manipulation et la navigation. Compte tenu des similitudes entre les techniques employées pour la sélection et la manipulation, Hand [87] suggère de les considérer ensemble.

2.5.1 Contrôle d'application

Pour Grosjean [83], le contrôle d'application est une tâche élémentaire fondamentale à toute application puisque son rôle est de permettre le dialogue entre l'utilisateur et l'application elle-même. Le but du contrôle d'application est le déclenchement de fonctions et d'options de l'application.

Pour le contrôle d'applications 2D, les WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointers) se sont imposés comme standard. Par contre en EV, les WIMP classiques sont rarement utilisables. Plusieurs solutions ont été proposées pour permettre le contrôle du système dans des EV. Ces solutions peuvent être classées en deux catégories, les menus 2D et les menus 3D.

Les applications de la première catégorie affichent des menus 2D sur des fenêtres de l'EV (Figure N° 28). Ces menus 2D peuvent être attachés à l'interface d'action, au point de vue de la caméra, à l'utilisateur, à un objet particulier ou alors elles peuvent être flottantes [36, 73, 127].



Figure N° 28. Menu 2D dans un espace 3D

Les applications de la seconde catégorie utilisent des menus 3D [176, 201]. Ces menus 3D peuvent prendre des formes variées, mais sont toujours des volumes ou ensembles de surfaces et non des surfaces isolées (Figure N° 29). Le Command & Object Control Cube (C3), par exemple, utilise des menus 3D et des gants de données [84]. Dans cette application, le système est contrôlé au moyen de cubes affichés à proximité de la main de l'utilisateur. D'autres approches privilégient la voix ou la reconnaissance de geste pour le contrôle du système [17, 110].

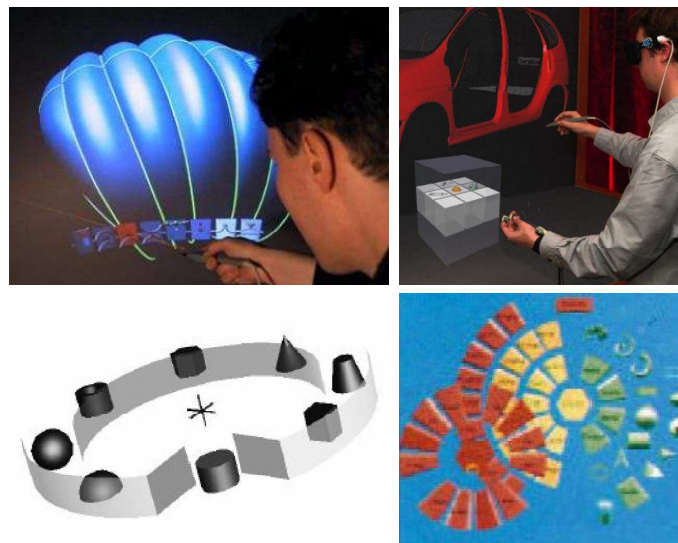


Figure N° 29. Menu 3D

2.5.2 Navigation

Bowman et al. [28] définissent la navigation dans un environnement virtuel comme l'action de déplacer ou de modifier les paramètres du point de vue de l'utilisateur dans l'EV, sans déplacement physique (ou limité). Ils distinguent deux manières d'aborder le problème de la navigation : soit l'utilisateur peut changer de point de vue de manière discrète en se téléportant d'un endroit à un autre, auquel cas la navigation se ramène à un problème proche

du contrôle d'application, soit l'utilisateur peut naviguer librement et possède à tout moment un contrôle total sur sa position dans l'EV.

Darken et Sibert ont montré que l'utilisation de cartes de navigation dans les EV peut améliorer les performances lors de tâches de navigation [54, 55]. Mackinlay et al. ont utilisé une technique d'interaction qui consiste à désigner un objet cible dans l'EV et à déplacer le point de vue jusqu'à l'objet choisi [125]. Ware et al. ont proposé trois métaphores: "scène dans la main", "contrôle de véhicule" et "globe oculaire dans la main" [199]. La métaphore "scène dans la main" consiste à modifier le point de vue sur la scène en manipulant la scène elle-même. La métaphore "contrôle de véhicule" permet de se déplacer dans l'EV, comme on le ferait si on conduisait un véhicule volant. La métaphore "globe oculaire dans la main" permet de déplacer directement la caméra, comme si on la tenait dans la main. Stoakley et al ont proposé la métaphore "monde en miniature" (Figure N° 30), qui consiste à interagir sur une représentation miniature de la scène virtuelle [184].



Figure N° 30. Monde en Miniature

Dominjon et al. [62] proposent une nouvelle technique d'interaction pour résoudre le problème de l'interaction haptique avec un environnement virtuel à échelle humaine, dont les dimensions de la restitution dans l'espace de manipulation sont supérieures à celles de l'espace de travail de l'interface mise en oeuvre. Ce cas se présente par exemple lorsqu'une automobile virtuelle est restituée en grandeur réelle. Cette technique tire son nom de la représentation visuelle de l'espace de travail de l'interface, d'apparence similaire à une bulle de savon. Ils proposent d'utiliser un volume sphérique afin de permettre à l'utilisateur la même capacité

d'utilisation dans toutes les directions (Figure N° 31). L'objectif est de conserver un espace de travail aussi grand que possible. Le rayon de la sphère est donc choisi le plus grand possible, tout en garantissant que l'interface n'atteint jamais ses butées mécaniques.

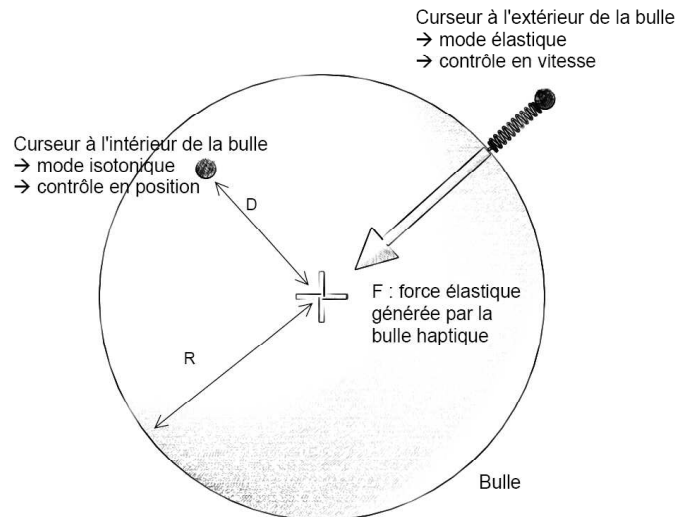


Figure N° 31. La "Bubble" Technique [62]

D'autres techniques d'interaction "naturelles" sont proposées afin de libérer les mains de l'utilisateur de tous autres périphériques que ceux associés à la manipulation des objets [22, 23]. Pour mettre en oeuvre ce paradigme de contrôle "main libre" des navigations virtuelles, une solution a été mise au point qui permet à l'utilisateur de se déplacer dans la totalité du monde virtuel à l'aide d'un simple capteur à 6 degrés de liberté fixé sur la tête de l'utilisateur. Ce système est basé sur le traitement de l'écart du référentiel courant du capteur par rapport à celui d'un référentiel neutre issu d'une calibration. Ainsi, à l'instar de la manette de jeu dont la position neutre est celle au repos, plus l'utilisateur s'écarte du référentiel calibré, plus les déplacements sont rapides dans la direction visée. Le principe de ce système est suffisamment générique pour être utilisé par d'autres parties du corps.

2.5.3 Sélection/Manipulation d'objets

Il est à l'heure actuelle assez difficile de saisir et manipuler un objet virtuel avec autant d'aisance qu'un objet réel. Pour cette raison, plusieurs techniques ont été développées afin de simplifier et faciliter l'interaction de l'utilisateur avec les objets de l'EV. L'objectif global de ces techniques est donc de modifier l'état d'un objet. Cette tâche se décompose en deux

phases, une première phase de sélection et une seconde phase de manipulation de l'objet sélectionné.

Mine [126] définit la sélection comme l'action de pointer et valider un objet. Cette opération permet de choisir une entité parmi d'autres. Ensuite, il définit la manipulation comme le fait de modifier l'état d'un objet. Les propriétés les plus fréquemment concernées sont la position et l'orientation des objets.

Différentes techniques d'interaction permettent la sélection et la manipulation d'objets virtuels. Ces techniques peuvent être classées en deux grandes catégories, selon que l'objet cible est proche ou distant.

Lorsque l'objet de l'EV est considéré comme proche de l'utilisateur, une interaction "naturelle" peut être utilisée, c'est-à-dire que l'utilisateur sélectionne un objet virtuel en l'attrapant directement. Une fois l'objet attrapé, l'utilisateur le manipule comme il le ferait si l'objet était réel. Pour ce type d'interaction, les interfaces de RV couramment utilisées sont des gants de données équipés de capteurs de position, et la technique d'interaction utilisée est celle de "la main virtuelle" [160]. Elle consiste à représenter la main de l'utilisateur par un avatar dans le monde virtuel et à lui assigner en temps réel les mouvements de la main réelle (Figure N° 32).

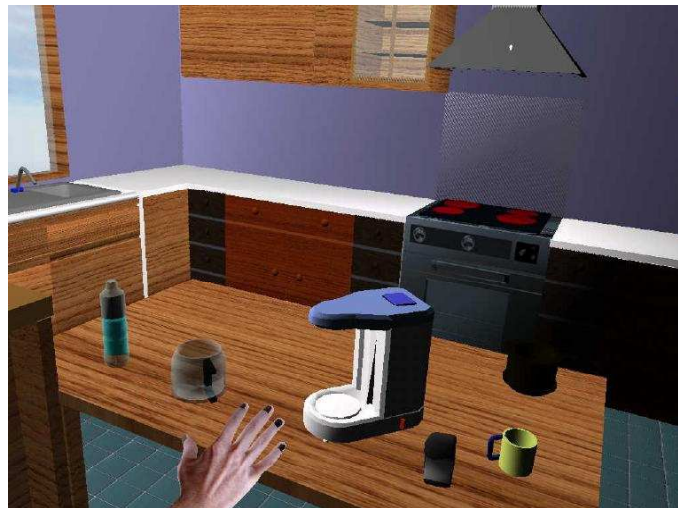


Figure N° 32. Métaphore de la main virtuelle

Dés lors que les objets ne sont pas directement accessibles, il est nécessaire d'utiliser des techniques d'interaction pour la sélection et la manipulation des objets virtuels distants.

Parmi ces techniques, on peut citer le "lancer de rayon" (Figure N° 33) qui consiste à sélectionner et manipuler un objet au moyen d'un rayon virtuel [93, 126]. Comme il est difficile de sélectionner des petits objets au moyen du "lancer de rayon", cette technique a été étendue en remplaçant le rayon de sélection par un cône de sélection [74, 120]. Poupyrev et al. [151] ont adapté la technique de la "main virtuelle" aux objets distants en proposant une technique basée sur l'extension d'un bras virtuel, la "Go-Go" (Figure N° 34).

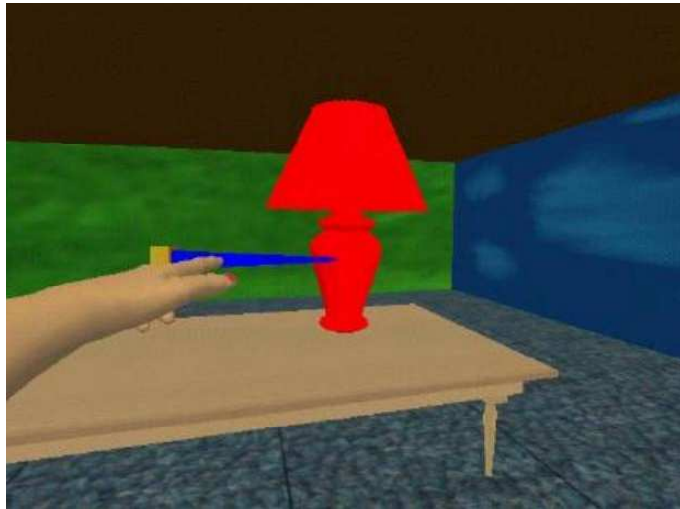


Figure N° 33. Lancer de rayon



Figure N° 34. Go-Go technique

Pierce et al. proposent d'interagir avec les objets de la scène en manipulant leur projection sur un plan 2D [147]. La sélection de la projection de l'objet sur le plan peut se faire de différentes manières (Figure N° 35), en pointant l'objet du doigt, en l'entourant du

pouce et de l'index, en l'encadrant avec les mains ou en plaçant la main ouverte à plat sous l'objet.

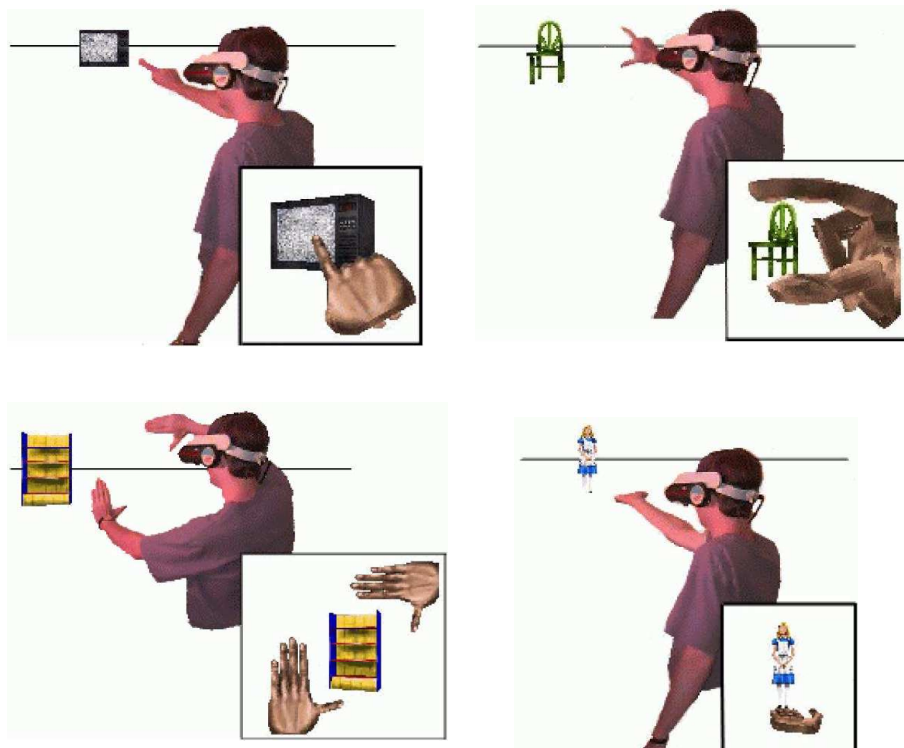


Figure N° 35. Technique de l'image plane

D'autres approches consistent à combiner plusieurs techniques. La technique "HOMER" par exemple, combine le "lancer de rayon" et la "main virtuelle" [26]. Une fois l'objet sélectionné à l'aide du rayon virtuel, on passe en mode manipulation et la main virtuelle est alors projetée sur l'objet (Figure N° 36).

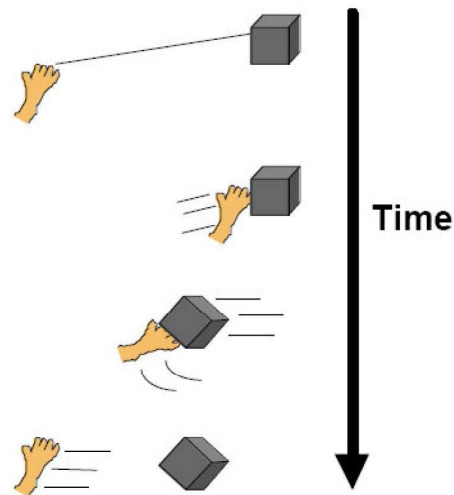


Figure N° 36. HOMER

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les différences de performances entre les différentes techniques de sélection et de manipulation [26, 152].

Il existe aussi des approches visant à rendre plus naturelles les interactions en EV, en utilisant par exemple la reconnaissance de gestes et la reconnaissance vocale. Les travaux de Bossard et al. [20] se focalisent sur les interactions multimodales et plus particulièrement sur les modalités gestuelles et vocales, permettant une interaction naturelle avec l’environnement immersif dans lequel est plongé l’utilisateur. Une application de démonstration multimodale (Figure N° 37) a été créée dans le but de démontrer les différentes interactions possibles en combinant le geste et la parole. Le geste de saisie permet de manipuler tout objet qui est à portée de main, et le geste de désignation combiné aux commandes vocales (par exemple “prend cet objet”) permet d’interagir avec les objets situés hors de portée.

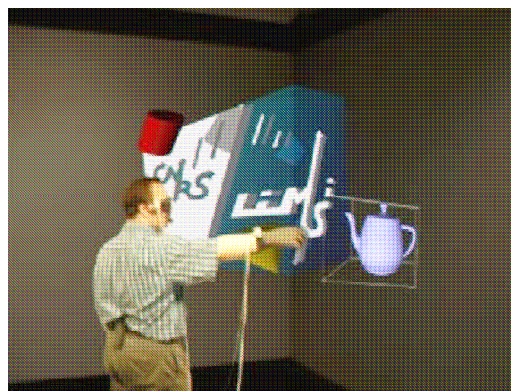


Figure N° 37. Démonstrateur "LogoMultimodal" [20]

2.5.4 Synthèse

Le tableau suivant présente une synthèse des techniques d'interactions présentées précédemment.

Interaction	Technique
Contrôle d'application	<ul style="list-style-type: none">- Menu 2D- Menu 3D<ul style="list-style-type: none">- Command & Control Cube (C3)- Menu en anneau- Menu en bande- Menu en disque
Navigation	<ul style="list-style-type: none">- Monde en miniature- Scène dans la main- Contrôle de véhicule- Globe oculaire dans la main- Bubble- 6 dof
Sélection/Manipulation	<ul style="list-style-type: none">- Main virtuelle- Lancer de rayon- Go-Go- Image plane- HOMER- Reconnaissance de gestes- Reconnaissance vocale

Tableau N° 3. Synthèse des techniques d'interactions en EV

2.6 Domaines d'applications de la RV

L'informatique a joué un rôle significatif dans la réalisation de ce qui semblait être seulement un rêve d'écrivains de science fiction. Il y a déjà de nombreuses années que les écrivains de science fiction ont exploré le potentiel de l'informatique et ont décrit un monde artificiel 3D aussi vraisemblable que le monde réel [196], où les utilisateurs peuvent interagir avec leur environnement comme ils le feraient dans le monde réel. Dans cet objectif et grâce aux progrès de l'informatique, une nouvelle technologie est apparue, la Réalité Virtuelle (RV).

Aujourd'hui, la RV est utilisée dans de nombreux et divers domaines tels que la médecine, la formation, la télévision, la visualisation scientifique, l'architecture, l'armée ou l'ingénierie. Quelques unes des applications les plus prometteuses concernent les simulateurs

d'entraînement, le traitement des phobies et la conception de produits qui nous intéressent plus particulièrement.

Les simulateurs d'entraînement sont utilisés pour former au pilotage de véhicules tels que des avions, des tanks, des hélicoptères, des bateaux, des grues ou des trains. Ils permettent aussi de former des contrôleurs aériens ou des chirurgiens. De tels simulateurs tentent de reproduire un environnement et des situations aussi réalistes que possible. Ces simulateurs ont des avantages certains. Par exemple, un pilote d'avion peut s'entraîner à des atterrissages difficiles par mauvais temps, sans danger pour lui ou ses passagers. Un chirurgien peut se former à une intervention spécifique, avant de la réaliser réellement. De plus, il existe des situations difficilement reproductibles dans la réalité, telles qu'un déraillement de train ou une complication chirurgicale. Les utilisateurs peuvent alors se former à ces situations et les répéter à volonté.

La phobie est une peur excessive et incontrôlable face à un événement déclencheur, qui peut aller jusqu'à bouleverser la vie familiale et professionnelle des personnes concernées. Par exemple, une personne arachnophobe peut s'évanouir devant une araignée. Une des méthodes de traitement des phobies est celle de l'exposition où le patient est placé concrètement face à l'objet de sa phobie. À ses côtés, un psychothérapeute lui apprend à affronter plus normalement la situation qui le rend malade et à ne plus l'appréhender. Depuis l'émergence de la RV, une nouvelle méthode de traitement des phobies par la RV est apparue. Cette méthode consiste à mettre en situation le patient dans un environnement virtuel. Le principal avantage de cette nouvelle forme de traitement est son coût, car il est plus coûteux d'amener un patient en un lieu réel de manifestation de sa phobie. De plus, en cas de crise sévère du patient, le psychothérapeute a la possibilité d'arrêter à tout moment la simulation.

En conception de produits, il est nécessaire d'utiliser des représentations intermédiaires du futur produit dans les phases amonts du processus de conception, car une modification du produit dans les phases finales serait plus coûteuse [43, 57]. Ces représentations intermédiaires sont nécessaires pour évaluer et valider le produit. Traditionnellement, des représentations physiques sont utilisées, mais la réalisation d'une représentation physique est longue et onéreuse. D'après Richir [157], l'utilisation de la RV en conception de produits permet de réduire le nombre de représentations physiques. De plus, il est plus facile et plus rapide de modifier ou de décliner un produit virtuel. Enfin, les représentations virtuelles

permettent d'améliorer la compréhension entre les différents corps de métiers et entre concepteurs et clients.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté différentes définitions de la RV. Dans le cadre de notre recherche, nous avons adopté la définition de Fuchs et al. [76]. Ce qu'il est important de retenir est que la RV est une simulation 3D en temps réel. Elle doit être considérée comme un outil qui en conception de produits, permet à l'utilisateur d'évaluer des produits virtuels interactifs et non pas des images de produits.

Nous avons ensuite brièvement retracé l'histoire de la RV, afin d'identifier ses objectifs initiaux et de comprendre le contexte et les raisons pour lesquels la réalité virtuelle a été utilisée dans le domaine de la conception de produits.

Ensuite, nous avons décrit les différents composants d'un système de RV, que nous avons classé en quatre catégories, à savoir les **environnements de RV**, les **interfaces** et les **techniques d'interactions**.

En conception de produits, l'évaluation visuelle des caractéristiques du futur produit est indispensable. C'est pourquoi, il est nécessaire d'utiliser un **environnement de réalité virtuelle** pour visualiser et évaluer une représentation intermédiaire virtuelle. Il existe de nombreux environnements de RV, allant de l'écran d'ordinateur classique jusqu'au visiocasque. Ces environnements peuvent être classés en trois catégories, selon leur degré d'immersion et d'interactivité. Un environnement de RV peut être immersif, non immersif ou hybride.

L'évaluation visuelle est effectivement nécessaire, mais parfois insuffisante. Il faut alors réaliser une évaluation multisensorielle des caractéristiques et fonctionnalités du futur produit. Pour cela, il est essentiel de pouvoir interagir avec celui-ci. Mais cette interactivité requière l'utilisation d'**interfaces** de réalité virtuelle. Le choix de l'interface de RV est très important car il conditionne la manière dont l'utilisateur interagit avec la représentation virtuelle. Ces interfaces de RV sont diverses, allant de la souris d'ordinateur jusqu'au bras à retour d'effort. Nous avons choisi de décrire les trois catégories d'interfaces les plus utilisées pour la conception de produits, les traqueurs de position, les gants de données et les interfaces à retour d'effort.

Les interfaces de réalité virtuelle permettent l'évaluation multisensorielle d'une représentation virtuelle. Cependant, ces interfaces ne sont pas parfaites, il est même parfois difficile de réaliser en EV une tâche aussi simple qu'une sélection d'objet. C'est pourquoi, il est souvent nécessaire d'utiliser des **techniques d'interactions**, en complément des interfaces de RV. Selon Coquillart et al. [50], la technique d'interaction est une méthode, un scénario d'utilisation de l'interface de RV, qui aide l'utilisateur à accomplir une tâche précise dans l'EV. Nous avons décrit ces techniques d'interactions en tenant compte du classement réalisé par Bowman [24] : le contrôle d'application, la navigation et la sélection/manipulation.

Nous avons ensuite présenté quelques applications de la RV dans différents domaines. Les applications qui nous semblent les plus prometteuses concernent les simulateurs d'entraînement, la médecine et évidemment la conception de produits.

Dans la suite du document nous allons tenter d'apporter des réponses à des questions telles que : Quelles sont les différences entre la conception traditionnelle et la conception utilisant la RV ? Quelles sont les avantages et les inconvénients de la RV en conception de produits ?

3 La Réalité Virtuelle et l'Evaluation de produits

3.1 L'innovation

Avant les années 70, l'offre de produits manufacturés était conditionnée par la demande. L'offre était peu diversifiée et les marges étaient tirées de la quantité de produits vendus. Depuis les années 70, nous sommes passés à un schéma où l'offre excède la demande, avec un marché devenant ainsi très concurrentiel. Les entreprises voulant s'adapter au marché, doivent pour cela réduire leurs prix de vente et donc leurs coûts de revient. Elles doivent également proposer aux clients une offre caractérisée par sa diversité, son renouvellement régulier et sa perpétuelle nouveauté. Pour assurer cette offre, les entreprises sont confrontées à une quête de méthodes et d'outils pour améliorer leur aptitude à concevoir. Il ne s'agit plus de répondre à une demande, mais d'être capable d'innover et de mettre sur le marché des produits qui seront adoptés par les clients [13]. Ainsi, pour être innovantes tout en réduisant le prix de vente et les délais de mise sur le marché des nouveaux produits, les entreprises doivent réduire les coûts et les délais de conception de ces nouveaux produits.

L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) [137] définit l'innovation ainsi : "L'innovation est le processus qui permet de transformer une idée en un produit ou un service vendable, nouveau ou amélioré, ou en une nouvelle façon de faire. Le processus d'innovation couvre toutes les activités scientifiques, techniques, commerciales et financières nécessaires pour aller jusqu'au succès de la commercialisation du produit ou du service nouveau ou jusqu'à la mise en place effective de la nouvelle façon de faire". Les premières recherches dans le domaine de l'innovation sont attribuées à l'économiste Joseph Alois Schumpeter [168]. Il définit l'innovation comme le passage d'une invention au marché sanctionnée par une première transaction commerciale réussie.

D'après Delamarre [57], il existe trois types d'innovation ayant une nature profondément différente : l'innovation produit, l'innovation processus et l'innovation organisationnelle. L'innovation produit est constituée des activités de conception d'un objet matériel. Ce processus est sanctionné par la mise sur le marché d'un produit nouveau. L'innovation processus représente la mise en place de nouvelles façons de faire. Elle a souvent pour objectifs d'améliorer les performances du processus qu'il remplace et de s'adapter à des contraintes réglementaires nouvelles. L'innovation organisationnelle est un

changement de contexte et de rapport entre les individus pour faire évoluer une organisation ne correspondant plus au besoin de l'entrepreneur.

De nombreuses études dans le domaine de l'économie et du management stratégique s'accordent à dire que l'innovation est un facteur clé de succès et de survie pour les entreprises. Innover pour une entreprise, c'est être capable de se démarquer sur un marché concurrentiel en gagnant des parts de marché [188].

3.2 Les produits innovants

Notre recherche concerne en partie la conception de produits, nous nous focalisons donc sur l'innovation produit qui donne naissance à des produits innovants.

Un produit innovant est la matérialisation sous la forme d'un produit nouveau de la solution d'un problème de conception [81]. Il se caractérise par un état initial mal défini et des solutions finales nouvelles, multiples, dont sont retenues les plus satisfaisantes. Le passage entre les deux états est réalisé par une succession de représentations intermédiaires [123].

3.3 La conception

Perrin [144] précise que le processus central de l'innovation n'est pas la science, mais la conception et qu'il n'y a pas d'innovation sans conception. Selon Edwin Layton [111], du point de vue des sciences modernes, la conception n'a aucune importance, mais du point de vue de la technologie, la conception est fondamentale. En permettant l'adaptation des moyens pour atteindre un objectif, la conception constitue l'essence même de la technologie. La conception de produits a pour objet d'explicitier et de fournir des méthodes et outils au développement, depuis les phases d'invention jusqu'à celles de production et de maintenance, d'objets ou de services [202]. Ainsi comme l'indique son étymologie, la conception concerne la manipulation de concepts, c'est-à-dire la manipulation d'une représentation générale et abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets.

3.3.1 Le processus de conception

La conception en tant que processus est donc l'ensemble des activités permettant de construire des représentations reflétant une projection de l'esprit. Le processus de conception de produits part d'un besoin matériel ou immatériel pour aboutir à un produit.

Selon Bocquet [19], en génie industriel, la conception est un processus formalisé depuis l'identification d'un besoin jusqu'à la réalisation d'un produit en série :

- Etape 1 : de la définition des besoins au cahier des charges ;
- Etape 2 : du cahier des charges à l'avant projet ;
- Etape 3 : de l'avant projet au prototype industriel ;
- Etape 4 : du prototype industriel au produit réalisé en série.

Le processus de conception est défini comme l'ensemble des activités qui permettent de passer d'une idée, vue comme représentation d'un besoin, à la création d'un produit réel industrialisable. Ce processus est formel et comprend des états de représentations intermédiaires corrélés avec les étapes de la conception. Il est séquencé par différents états de représentations intermédiaires du produit, tels que les cahiers des charges, les esquisses, les maquettes ou les prototypes.

Pour réduire les coûts et les délais de conception, il faut s'intéresser aux phases amonts du processus de conception. En effet, comme l'illustre la Figure N° 38, les décisions prises dans les phases amonts du processus de conception représentent 60 à 80% des décisions de dépense nécessaires à la réalisation d'un produit et seulement 5 à 10% des dépenses engagées. Il est donc particulièrement important de s'intéresser à ces phases qui conditionnent à la fois la maîtrise des coûts et des délais de conception du futur produit. Ceci d'autant plus que les dépenses qu'elles représentent sont de plus en plus négligeables, grâce à l'utilisation croissante des techniques numériques dans l'ensemble du processus.

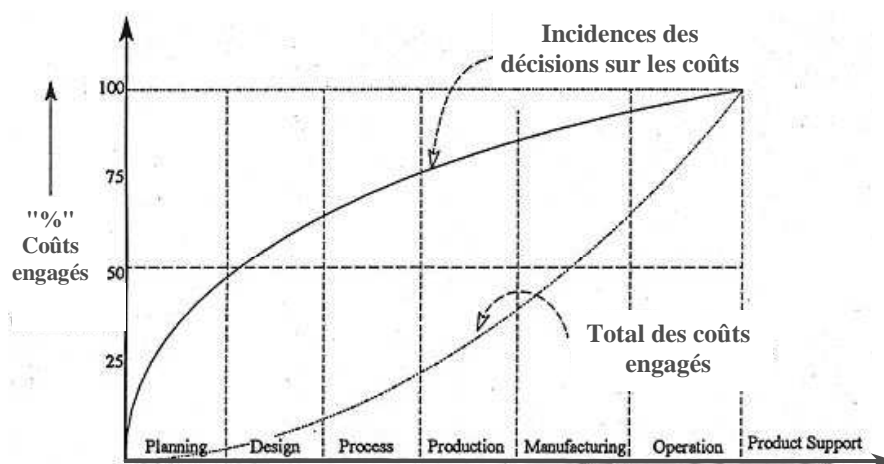


Figure N° 38. Coûts engagés en fonction de l'avancement du projet [190]

L'époque où il suffisait d'avoir le produit au meilleur rapport qualité/prix est dépassée. D'une manière générale, l'offre et la complexité des produits croissent, alors que le temps de développement et la durée de vie des produits décroissent. Les phases amonts du processus de conception deviennent alors les plus importantes du cycle de vie d'un produit.

Plusieurs études ont formalisé le processus de conception. Nous présentons ici le Cycle en V (Figure N° 39) et la formalisation proposée par Aoussat [7] (Figure N° 40).

Dans le cycle de conception en V, le produit à concevoir est considéré comme un système décomposable en éléments simples. La conception peut donc être ramenée à la conception de ses composants, que l'on intègre ensuite à la structure globale.

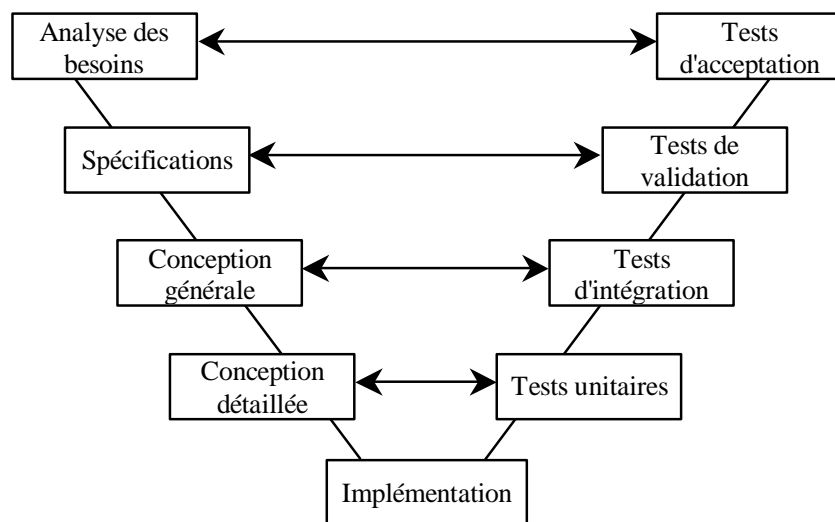


Figure N° 39. Cycle de conception en V

La formalisation proposée par Aoussat décrit l'évolution des représentations intermédiaires dans un projet de conception classique, depuis l'identification du besoin jusqu'au produit. Notre travail de recherche portera notamment sur l'utilisation de ces représentations intermédiaires.

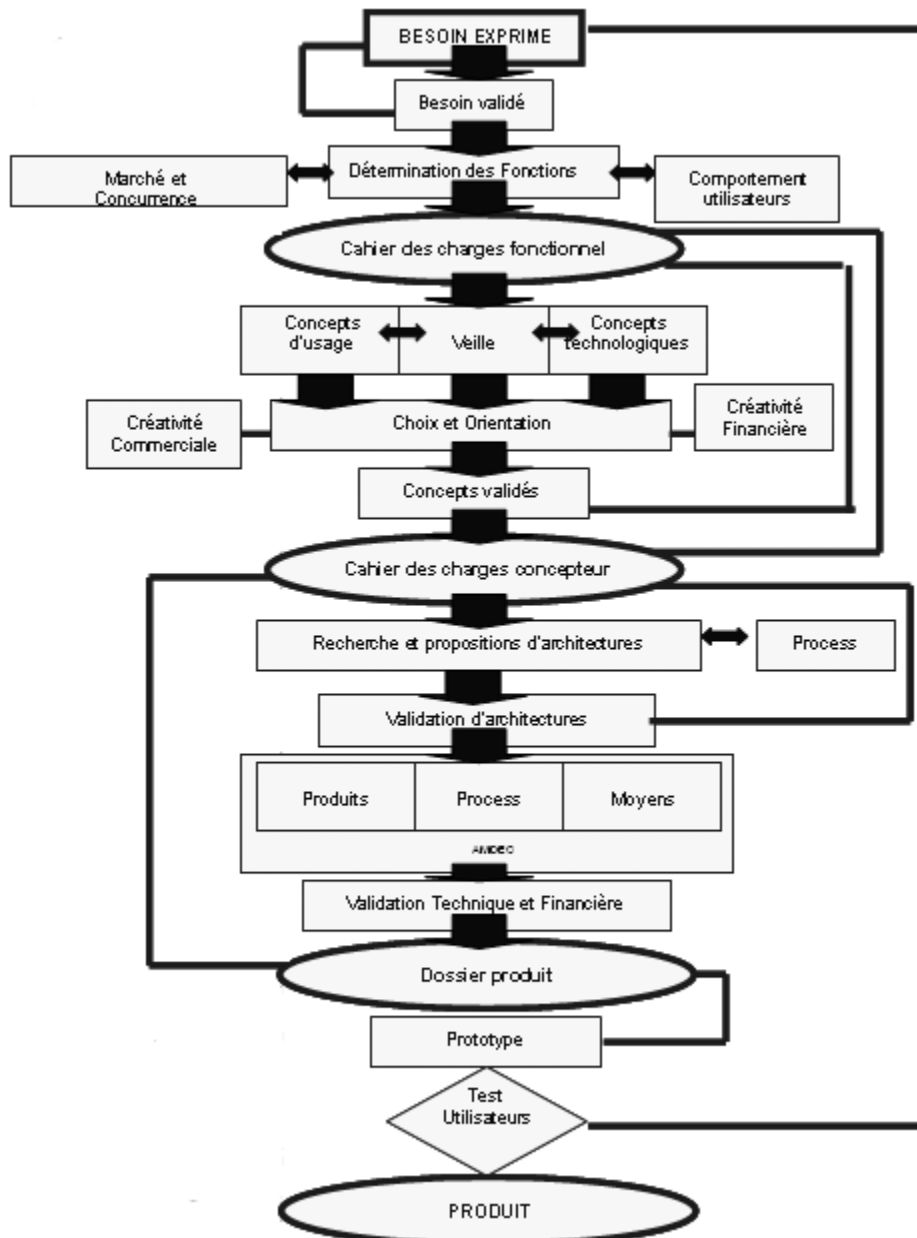


Figure N° 40. Formalisation du processus de conception d'Aoussat [7]

3.4 Problématiques de la conception de produits

Parmi les contraintes inhérentes à la conception d'un produit, le temps et le coût occupent une place majeure. Le coût élevé et la longue période nécessaire à la conception d'un produit peuvent être attribués entre autres, à la nécessité de réaliser de multiples représentations intermédiaires physiques ainsi que des environnements de tests réels. Lors de l'évaluation de ces représentations intermédiaires, si un défaut est constaté, il faut à nouveau

réaliser d'autres représentations intermédiaires physiques, très coûteuses et longues à fabriquer.

Les entreprises veulent raccourcir au maximum le délai entre les spécifications d'un produit et sa vente, tout en innovant sans cesse. Pour cela, les premières représentations doivent être plus détaillées et la perception des différentes caractéristiques de base doit être garantie. Cela permet d'évaluer et de prendre des décisions au plus tôt.

3.4.1 L'évaluation de produits

L'objectif des entreprises est d'acquiescer un avantage concurrentiel en lançant sur le marché des produits "bons du premier coup", avant la concurrence. L'équipe de conception doit pour cela valider les performances du produit conçu, car il est nécessaire de s'assurer de la conformité du produit aux spécifications du cahier des charges. Cependant, il est parfois difficile d'évaluer certaines caractéristiques du produit, en particulier lorsque cela requiert une mise en situation dans un environnement réel qui n'a pas encore été réalisé. Ces caractéristiques telles que l'encombrement ou les couleurs du produit sont alors évaluées à posteriori, ce qui peut engendrer des modifications tardives.

Les phases d'évaluation sont à la base d'un long processus d'ajustement du produit. Si une erreur est détectée, le processus de conception revient à l'étape de définition pour proposer une alternative qui sera réévaluée. Les délais de réaction peuvent alors compter plusieurs mois. Les itérations de conception les plus rapides sont habituellement dans la phase de définition, où les idées sont généralement générées, vérifiées et sélectionnées ou rejetées dans des délais de l'ordre de la semaine [170].

Si un problème est détecté au stade de la production par exemple, il faut revoir la conception à partir d'une étape antérieure et réengager une grande partie des dépenses déjà investies. La Figure N° 41 montre que cela peut s'élever jusqu'à 75% du coût du produit dans les cas extrêmes.

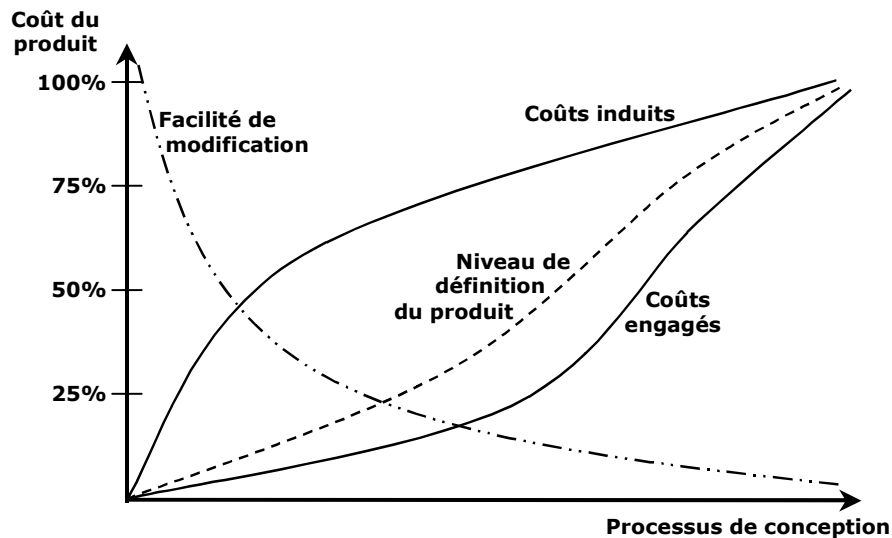


Figure N° 41. Coût d'un produit durant sa conception [163]

3.4.2 La prise de décision

Nous avons vu précédemment l'importance des décisions prises dans les phases amonts du processus de conception (Figure N° 38). Même si le développement d'un projet s'opère à travers des décisions dont les implications ne peuvent pas toujours être immédiatement prises en compte [134].

La prise de décisions est un élément important du processus de conception. La prise de décisions est réalisée à travers un processus de formulation d'hypothèses et de correction de ces hypothèses. Les concepteurs sont continuellement confrontés à des prises de décision. Selon Vélez, une difficulté majeure en conception est la lenteur du cycle de formulation et de correction des hypothèses de conception [195]. Il s'agit du processus à travers lequel le concepteur formule et ultérieurement corrige les hypothèses de conception (Figure N° 42). La lenteur de ce cycle limite la production d'idées du processus créatif et favorise le maintien de solutions non conformes au cahier des charges, affectant ainsi les décisions prises ultérieurement. Quelquefois, le concepteur doit attendre jusqu'à la fabrication du produit pour obtenir une réponse qui lui permette de confronter ses hypothèses de conception au résultat. C'est alors seulement qu'il peut critiquer et vérifier efficacement le degré d'adéquation de la solution proposée.

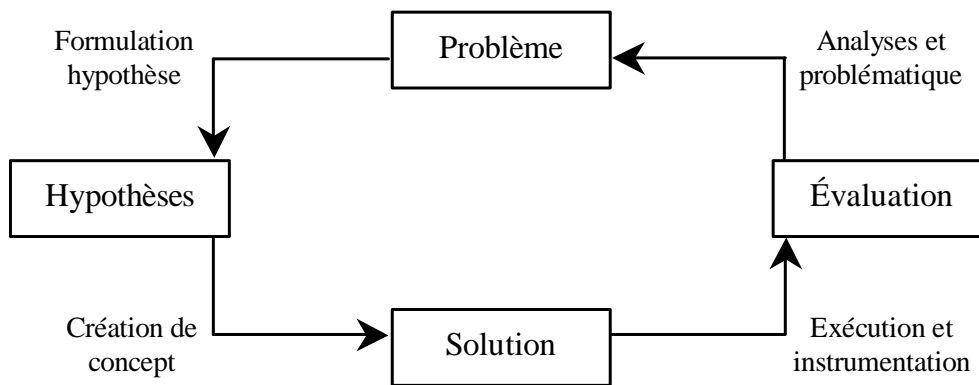


Figure N° 42. Cycle de formulation et de correction des hypothèses de conception [43]

La vitesse d'exécution de ce cycle affecte significativement les coûts et les délais de conception du futur produit. Ainsi, un cycle de prise de décision lent entraîne une conception lente et des coûts de conception qui augmentent. La lenteur de ce cycle est en grande partie due à la lenteur de la phase d'évaluation des hypothèses de conception. Cette phase d'évaluation est très importante car elle permet aux concepteurs d'avoir une meilleure connaissance du produit. De plus, la lenteur de la phase d'évaluation est principalement due aux représentations intermédiaires traditionnelles utilisées lors de cette phase, tels que la maquette physique ou le prototype physique.

3.4.3 Les représentations intermédiaires traditionnelles

Pour la conception d'un nouveau produit, il est nécessaire d'utiliser des représentations intermédiaires afin d'évaluer le produit, identifier les défauts du produit, trouver des solutions alternatives et déterminer les coûts de fabrication [53]. Les concepteurs utilisent différentes représentations intermédiaires pour visualiser leurs concepts. Ces représentations intermédiaires sont pour eux un moyen de simuler les différentes caractéristiques du produit. Il existe de nombreuses définitions des représentations intermédiaires, dont voici quelques exemples:

"Ce sont des outils d'interaction, entre l'ensemble des acteurs de la vie du produit, afin de permettre des échanges et des compréhensions mutuelles plus efficaces." [189]

"Ce sont des représentations simplifiées d'un système, ayant pour objectifs d'accroître notre capacité à comprendre, à prévoir et si possible à contrôler les comportements futurs du système." [133]

"Ce sont des représentations simplifiées d'un produit, contenant quelques-unes de ses propriétés essentielles, représentées de manière similaire ou égale." [71]

"Ce sont des représentations contenant certaines propriétés du produit et privées de certaines autres." [35]

Pour Yannou [205], le concept est également un objet intermédiaire dans la représentation de ce que sera le produit final.

Les représentations du produit sont souvent utilisées pour partager les idées et réduire le risque de changements tardifs coûteux [193]. Ces représentations du produit peuvent aider l'équipe de conception à comprendre les différentes fonctionnalités du produit. Allen a été un des premiers à montrer l'influence de la rapidité de circulation des informations dans les projets, sur la performance des équipes en recherche et développement [4]. Selon Nonaka, dans une équipe un tiers du temps est consacré aux échanges d'informations [135]. Il s'agit de se comprendre, mais surtout de se comprendre vite et bien. Cependant, le vocabulaire et sa diversité sémantique sont sujets à interprétation selon sa propre langue et sa propre culture [191]. Les représentations intermédiaires sont utilisées tout au long du processus de conception, de l'idée initiale jusqu'au produit final. Les représentations intermédiaires sont un outil de l'activité de conception, permettant de décrire le futur produit. Söderman [182] a défini quatre types d'utilisation des représentations intermédiaires dans le processus de conception.

1. Evaluer le futur produit ;
2. Identifier les erreurs dans les phases amonts du processus de conception ;
3. Stimuler le dialogue entre les différents acteurs ;
4. Aider à la prise de décision.

Johansson [96], considère les représentations intermédiaires comme un média d'information, qui permet aux membres de l'équipe de conception, issus de métiers différents, de décider ensemble des choix de conception. Il définit sept utilisations des représentations intermédiaires:

1. Evaluation du produit par l'utilisateur ;
2. Tests et évaluations techniques ;

3. Définition des besoins du client ;
4. Evaluation esthétique ;
5. Validation de concept ;
6. Communication interne et externe ;
7. Présentation commerciale.

3.4.3.1 Le dessin

Les premières représentations d'un produit sont très souvent des dessins. Le dessin a été l'outil de simulation graphique le plus naturel et le plus simple dont nous avons pu nous servir. Ces dessins peuvent être en noir et blanc ou en couleur, mais également en 2D ou en 3D. Le dessin joue un rôle important en conception de produits. Won [203] a déclaré que le dessin est le plus efficace et le plus rapide moyen pour le concepteur d'exprimer ses idées. La mise sur papier de la représentation mentale d'un produit ajoute de la clarté à la conception [169]. Initialement réalisés à la main par des dessinateurs, les dessins sont aujourd'hui fréquemment réalisés à l'aide de l'outil informatique. Traditionnellement, la première représentation intermédiaire est réalisée avec le crayon et le papier et non avec les ordinateurs, même si ceux-ci offrent de nombreux avantages. Cela est dû à la simplicité de l'interface : le crayon. Les changements sont obtenus facilement et la précision n'est pas nécessaire pour exprimer une idée [208]. D'après Gross [85], les concepteurs préfèrent l'utilisation du papier et du crayon, qui supportent l'ambiguïté et l'imprécision, en plus de permettre l'exploration rapide des solutions. L'ambiguïté permet de maintenir plusieurs possibilités pour la sélection ou l'identification ultérieure d'un élément et aide le concepteur à développer de nouvelles idées. L'imprécision assure au concepteur que certaines décisions demeurent ouvertes [112, 141]. Selon Lebahar [112], le dessin d'architecte est un dessin d'espaces, et les dessins d'espaces sont des instruments graphiques dans le sens où le dessin se réfère et possède une valeur spatiale. Il permet au concepteur de "visualiser" une solution mentalement construite par des formes différentes : un cercle, une boule, un arc, un carré, un triangle, etc. Le dessin est une image technique qui simule déjà pour le concepteur l'objet futur et lui permet d'agir sur ces figures planes. D'autre part, c'est parce que ces formes sont dotées de significations architecturales que l'architecte établit une relation analogique entre sa représentation plane et l'objet en trois dimensions [59].

Le dessin est une bonne représentation visuelle du produit, mais cette représentation est statique d'un point de vue spatial. Si l'on souhaite plusieurs points de vue d'un même produit, il faut réaliser autant de dessins que de vues souhaitées (Figure N° 43). De plus, le dessin ne permet pas d'évaluation tactile, ni fonctionnelle du futur produit.

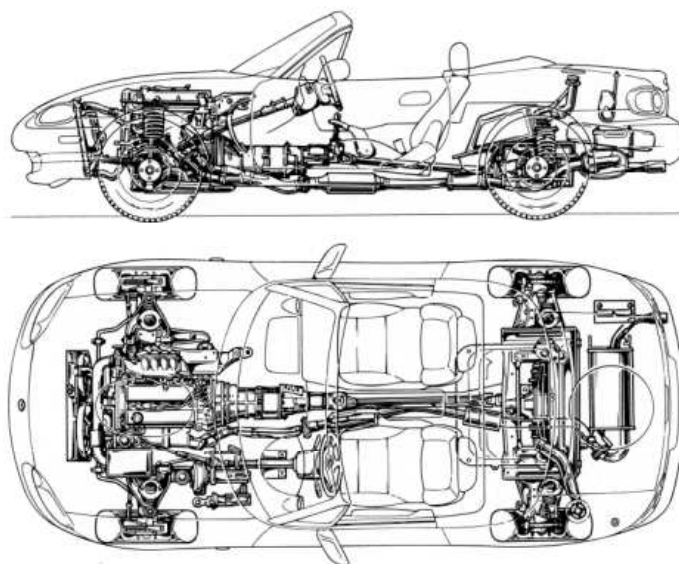


Figure N° 43. Vues de profil et de dessus de la Mazda Mx5

3.4.3.2 La maquette physique

Les Maquettes Physiques (MP) sont fréquemment utilisées par les concepteurs pour percevoir les propriétés visuelles du futur produit. En architecture par exemple, les maquettes physiques permettent aux concepteurs, aux architectes, aux entrepreneurs et aux clients de mieux visualiser un projet architectural, avant que les travaux ne soient commencés. En plus de la possibilité d'étudier les propriétés visuelles du produit final, les maquettes physiques permettent aussi d'évaluer la faisabilité du produit et de confronter le point de vue des membres de l'équipe. De plus, une maquette physique de bonne qualité peut être utilisée pour vendre le projet à des clients potentiels ou faire de la communication autour d'un projet.

En architecture, les maquettes physiques sont généralement à échelle réduite (Figure N° 44), ce qui crée un effet "Gulliver" [150], qui peut être gênant. De plus, une maquette réalisée à échelle réduite est difficile à étudier de l'intérieur, même à l'aide d'un endoscope.

En plus du coût et du temps important nécessaire à la fabrication d'une maquette physique, celle-ci ne permet qu'une évaluation esthétique du produit. Elle ne permet pas d'évaluation tactile, ni fonctionnelle du futur produit. En outre, la maquette physique est difficilement modifiable.



Figure N° 44. Maquette du palais de l'Emir Amine au Liban (1/200)

3.4.3.3 Le prototype physique

Le prototype physique désigne le premier ou l'un des premiers exemplaires d'un produit. Cet exemplaire permet des tests afin de valider les choix de conception. Le prototype précède généralement les exemplaires de pré-série [202].

Le prototype physique existe réellement, donc l'utilisateur peut interagir avec cette représentation du produit de façon naturelle et en utilisant tous ses sens (vue, toucher, ouïe, odorat, goût). Il peut aussi tester les fonctionnalités du futur produit (Figure N° 45). Le prototypage physique est aujourd'hui très répandu dans l'industrie.

Tâche	Utilisation
Mise au point de la définition	Détection d'anomalies, jeux, débats, positionnement des pièces
Montabilité / Montage	Détermination de chemins d'accès, faisabilité d'opérations, révélation de contraintes

Accessibilité du personnel de maintenance	Calcul de la durée d'intervention, ergonomie, utilisation d'outils
Conception / Fabrication / Installation de tuyauteries	Concernant toutes les tuyauteries hydrauliques, électriques ou conditionnement d'air : Estimation des chemins et des longueurs, notion de "mou" des tuyaux

Tableau N° 4. Tâches réalisées sur prototype physique [113]

Service	Utilisation
Le Bureau d'Etude	Pour la validation de la définition des problèmes de conception
La Production	Pour l'accessibilité, la montabilité, le réglage des outillages, l'installation des systèmes électriques
La Qualité	Pour le respect des jeux et des règles
Les Services Officiels	Pour vérifier les normes et la sécurité
Les Services Après-Vente	Au moment des réceptions et pour rédiger les manuels d'installation
Les Compagnies Clientes	En tant que "vitrine" et pour des vérifications d'opérations de maintenance

Tableau N° 5. Utilisation multi-métiers d'un prototype physique [113]

Le prototype physique peut ainsi être très utile tout au long du processus de conception pour identifier les besoins du client, communiquer en interne et en externe, évaluer les différents concepts, valider les étapes importantes ou aider à la prise de décision. Cependant, il n'est généralement fabriqué que lors des phases finales du processus de conception, avant le lancement de la production en série. Cela est dû aux coûts et au temps importants nécessaires à sa fabrication et qui croissent en fonction de la complexité du prototype à réaliser.



Figure N° 45. Prototype physique de la future Laguna III de Renault

3.4.3.4 La maquette numérique

La conception de produits a subi de grands changements dus aux avancées dans le domaine de l'informatique. Nous sommes passés du dessin sur papier à la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), avec la possibilité de réaliser des Maquettes Numériques (MN). Une maquette numérique est une représentation géométrique d'un produit, généralement en 3D, réalisée sur ordinateur en vue d'analyser visuellement les caractéristiques d'un produit (Figure N° 46). Cette maquette numérique est plus rapide à réaliser et moins coûteuse que la maquette physique. Elle permet de comprendre un produit avant qu'il ne soit fabriqué, car voir le produit c'est déjà le comprendre. Les techniciens, ingénieurs et concepteurs qui définissent le produit peuvent discuter plus facilement sur les solutions techniques possibles et choisir la meilleure. Ensuite, les contrôles réalisés sur le produit avant sa fabrication permettent de détecter très tôt des problèmes ou des erreurs. Plus les problèmes sont résolus tôt, moins la correction coûtera cher à l'entreprise. L'intérêt n'est donc pas uniquement technique, il est aussi économique.

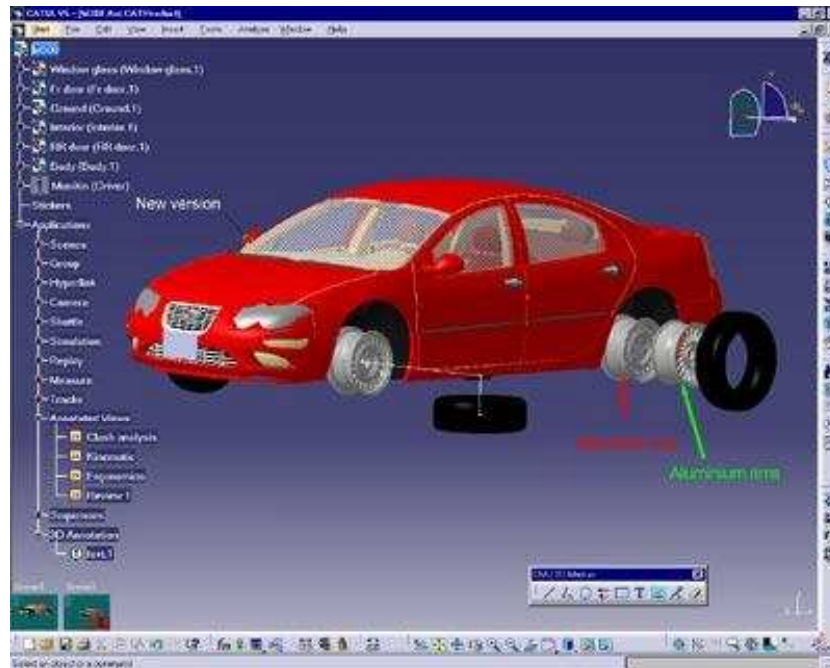


Figure N° 46. Maquette numérique réalisée avec CATIA V5

La maquette numérique est souvent utilisée comme un outil de représentation graphique, avec des interactions en temps réel très limitées et sans possibilités de mise en situation fonctionnelle du produit dans son environnement futur. Ce manque d'interactivité est principalement dû au poids de la maquette numérique. Une maquette numérique de moteur d'avion, par exemple, est un objet très complexe qui pèse très lourd en mémoire (plusieurs centaines de Mo). La mise à jour d'un tel modèle peut entraîner des temps de calcul pouvant dépasser la minute, ce qui est beaucoup trop long pour être compatible avec une interaction en temps réel. Toutefois, Convard et al. [47-49] proposent une approche basée sur des objets de CAO "réactifs". Cette approche permet de bénéficier des interactions "naturelles" offertes par les environnements immersifs. Ce modèle d'objets réactifs a été implémenté dans le projet VRAD. Celui-ci permet donc la création et la modification d'objets 3D dans un environnement immersif et multimodal, proposant ainsi une alternative intéressante aux interactions traditionnelles sur les arbres de construction pour la modification d'objets. Cependant, cette approche nécessite une puissance de calcul informatique importante, qui n'est pas toujours à la portée des PME. De plus, il n'est actuellement pas possible d'interagir tactilement avec ces objets réactifs, ce qui exclu l'évaluation tactile du futur produit.

3.4.4 Les limitations des représentations traditionnelles

Représentation	Limitation
Dessin	<ul style="list-style-type: none"> - Statique - Evaluation tactile - Evaluation fonctionnelle - Mise en situation
Maquette physique	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation tactile - Evaluation fonctionnelle - Temps de réalisation - Prix - Modification
Prototype physique	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de réalisation - Prix - Modification
Maquette numérique	<ul style="list-style-type: none"> - Poids des modèles - Interactivité - Evaluation tactile - Mise en situation

Tableau N° 6. Limitations des représentations traditionnelles

Malgré les nombreuses qualités des représentations intermédiaires traditionnelles, la popularité de celles-ci a rapidement décliné dans le secteur de l'industrie [44]. Cela est dû principalement à l'importance de leur coût et de leur temps de réalisation, mais il existe des limitations spécifiques à chacune d'elles.

Le dessin est limité car il est spatialement statique. La maquette physique est longue et coûteuse à réaliser et ne permet pas d'évaluation tactile, ni fonctionnelle du produit. Le prototype physique est très long et très coûteux à fabriquer. La maquette numérique permet des interactions en temps réel limitées, sans possibilités d'évaluation tactile du futur produit.

Pour tenter de résoudre ces problèmes, la Réalité Virtuelle est utilisée pour développer de nouvelles méthodes de représentation du produit : Les représentations intermédiaires virtuelles.

évolution de la conception assistée par ordinateur et Bullinger et al. [33] affirment qu'elle permet de stimuler l'innovation des entreprises (Figure N° 47). Dans une certaine mesure, la RV a été utilisée avec succès pour la visualisation scientifique, la simulation de vol, la téléprésence, la formation, l'éducation, la médecine, le divertissement, l'architecture et plus récemment pour la conception de produits qui nous intéresse plus particulièrement [10, 15, 207].

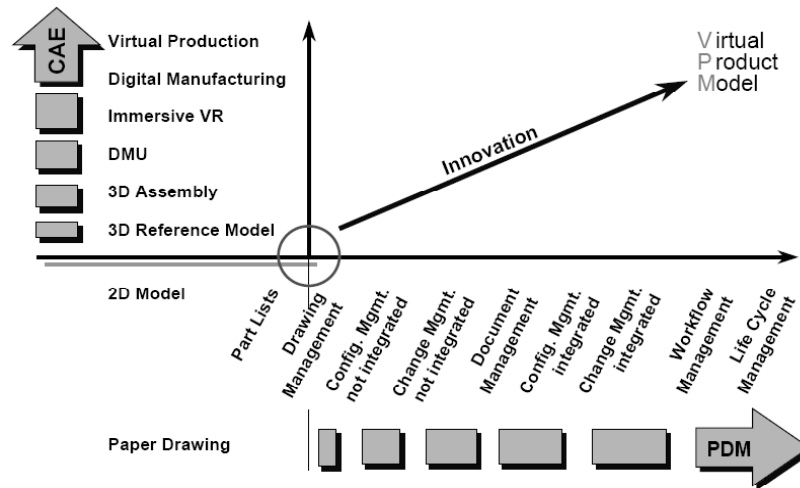


Figure N° 47. Tendances principales pour l'industrie de fabrication [33]

Selon Chedmail [41], l'utilisation de la RV permet une meilleure connaissance du produit, plus rapidement. La Figure N° 48 illustre la connaissance que l'on a du produit et la possibilité d'influencer son coût final, durant le processus de conception. La RV devrait ainsi permettre aux concepteurs d'évaluer leurs choix de conception au plus tôt et éviter ainsi d'attendre la réalisation longue et coûteuse de maquettes ou de prototypes physiques [41]. Cette évaluation au plus tôt et plus rapide permise par la RV, améliore significativement le processus de prise de décision décrit précédemment.

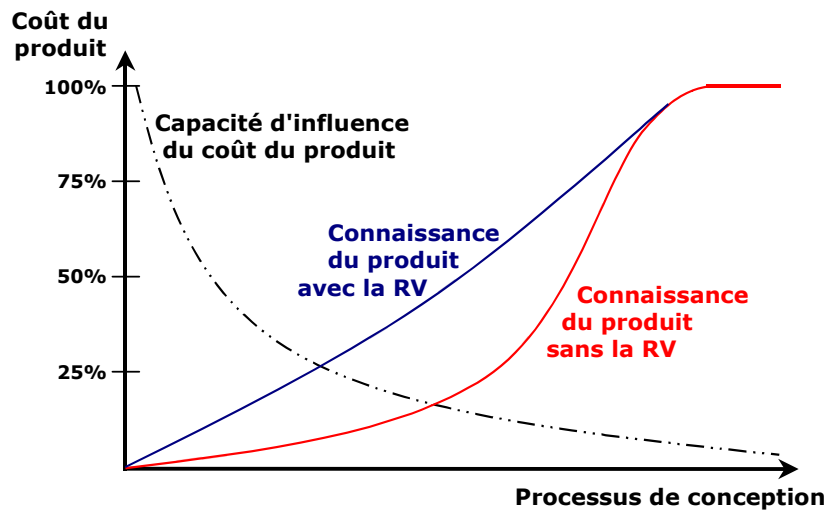


Figure N° 48. Influence du coût et connaissance du produit [122]

L'utilisation de la RV en conception de produits est la tendance actuellement poussée par le développement de la Chaîne Numérique de la Conception (Figure N° 49). Cette chaîne numérique de la conception permet de passer de l'abstrait au concret, d'une idée du produit au produit prêt à être commercialisé, en utilisant différentes représentations intermédiaires. Des représentations intermédiaires physiques (ou traditionnelles), que nous avons présenté précédemment, mais aussi des représentations intermédiaires virtuelles, telles que la maquette virtuelle et le prototype virtuel. Cependant, l'idée de base de l'utilisation de la RV en conception de produits est de remplacer les représentations intermédiaires physiques par des représentations intermédiaires virtuelles plus rapides à réaliser et moins coûteuses.

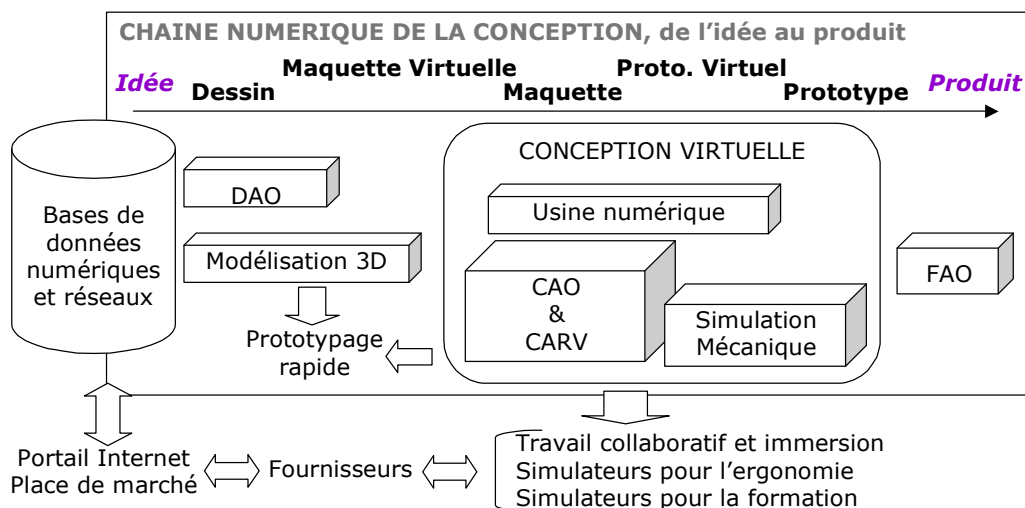


Figure N° 49. Chaîne Numérique de la Conception [157]

Les représentations intermédiaires virtuelles sont une application majeure de la RV en conception de produits [15, 178]. Selon Dai [52], l'utilisation des représentations virtuelles permet une analyse plus détaillée. De plus, la rapidité de réalisation des représentations virtuelles, permet d'évaluer un nombre important de déclinaison du produit, en minimisant le coût et le temps de réalisation.

Des grandes entreprises telles que Renault ou PSA reconnaissent l'intérêt de la RV et investissent dans ces technologies. On peut citer par exemple la salle de revue de projet Herley J. Earl de Renault [156], qui a permis d'économiser en six mois de 10 à 15% sur les coûts de conception. Dans le domaine de l'automobile, trois principaux modes d'utilisation de la RV en conception ont été identifiés [140]:

- 1) Pour réaliser des choix entre plusieurs hypothèses, pour les classer, éliminer les moins prometteuses et décider sur lesquelles concentrer les efforts. L'utilisation de la RV intervient très tôt dans le processus de conception, en remplacement des représentations physiques qui n'existent pas toujours à cette étape ;
- 2) En anticipation d'une maquette ou d'un prototype physique, pour détecter des anomalies ;
- 3) En accompagnement d'une maquette ou d'un prototype physique. De nombreux jalons de développement imposent la présence de maquettes ou prototypes physiques pour évaluer des critères tel que l'encombrement ou l'ergonomie. Les représentations virtuelles permettent à moindres frais de présenter les alternatives, les variantes, les dérivés, de mettre les véhicules dans des scènes de vie virtuelles. Physique et virtuel se complètent alors.

On retrouve l'utilisation de la RV tout au long du processus de conception pour la vérification ergonomique, l'évaluation de performance, la simulation fonctionnelle, les tests de faisabilité et la démonstration pré commerciale. La RV peut aussi être utilisée pour effectuer des tests utilisateurs en Environnement Virtuel (EV). Par ce biais, il est possible de valider des concepts et permettre, au plus tôt, de confirmer ou réorienter les choix de conception. De plus, La RV favorise l'interaction entre les différents acteurs [40, 117]. Enfin, la RV peut permettre aux futurs opérateurs de s'entraîner à des activités de fabrication et de maintenance [42, 132].

3.5.1 Les représentations intermédiaires virtuelles

Il y a différentes manières de représenter le futur produit. Traditionnellement, des représentations intermédiaires physiques telles que la maquette ou le prototype physique sont utilisées, mais la réalisation de ces représentations est longue et coûteuse. Il existe toutefois une alternative avec l'utilisation de représentations intermédiaires virtuelles.

Selon Fuchs [76], différents termes sont employés pour parler des représentations intermédiaires dans les domaines de la CAO et de la RV. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous adoptons la différenciation qu'il propose :

- Dans le cas de la CAO, le concepteur utilise la **maquette numérique** qui contient les informations de conception et de fabrication mécanique ;
- La **maquette virtuelle** est une représentation visuelle du produit conçu, mis dans son environnement. L'utilisateur peut ainsi naviguer autour et à l'intérieur de l'objet, du système ou de l'installation. Mais à part cette possibilité de navigation, l'utilisateur est passif face à cette maquette virtuelle ;
- Le **prototype virtuel** est une représentation sur laquelle l'utilisateur peut interagir. Ce dernier peut aussi s'immerger dans cette représentation dans le cas d'une installation ou d'un dispositif virtuels. L'utilisateur est donc actif : il peut, par exemple, manipuler l'objet ou un de ses sous-ensembles, tester l'ergonomie ou les fonctionnalités du dispositif. Il y a donc dans ce dernier cas une modélisation physique de la scène et une modélisation comportementale des objets qui permettent une simulation en temps réel.

Les avancées réalisées ces dix dernières années en informatique, ont permis d'accroître la qualité des représentations intermédiaires virtuelles. Il est actuellement possible de réaliser des maquettes et des prototypes virtuels possédant un rendu visuel réaliste et une bonne interactivité. Il est aussi possible de réaliser la représentation virtuelle d'un produit composé de plusieurs matériaux. De plus, il est très facile et rapide de modifier ou de faire évoluer une représentation virtuelle.

Les représentations virtuelles ont des avantages certains sur les représentations physiques [15, 67, 103]:

- Gain de temps et d'argent ;
 - La réalisation est facilitée par l'utilisation de l'outil informatique ;
 - Il est possible de décliner un concept de produit en gamme de produit rapidement et à faible coût ;
 - Les tests et évaluations peuvent être réalisés plus tôt et plus rapidement.
- Rapidité de modification et d'évolution des représentations intermédiaires virtuelles ;
- Facilité de manipulation des représentations volumineuses ;
- Favorise la compréhension et l'échange d'idées autour de la représentation ;
- Aides logicielles.
 - Permettre des points de vues difficilement envisageables avec une représentation physique (pièces de petite taille, exploration de l'intérieur du produit, transparence) ;
 - Accéder à des grandeurs non mesurables ;
 - Explorer des solutions inaccessibles (ex: nouvel alliage de matériaux) ;
 - Mettre en situation le produit dans un EV adéquat.

3.5.1.1 La maquette virtuelle

La Maquette Virtuelle (MV) permet une visualisation graphique du produit. De plus, contrairement à la maquette physique, elle permet une navigation en temps réel autour et à l'intérieur du produit [76]. La possibilité de disposer d'une représentation du produit à la fois intégrale, à jour et sur un support portable, permet aux différents métiers de pouvoir travailler conjointement, plus tôt et plus simplement. Les concepteurs peuvent ainsi contrôler l'encombrement du produit et l'esthétisme du produit.

Cependant, selon Fuchs et al. [76], l'utilisateur est passif face à cette maquette virtuelle. Celle-ci ne permet qu'une évaluation visuelle du produit, elle ne permet pas l'évaluation tactile et fonctionnelle du futur produit.



Figure N° 50. Maquette virtuelle d'un PDA de Hewlett-Packard

3.5.1.2 Le prototype virtuel

Schaaf [167] définit le prototypage virtuel comme étant un moyen rapide d'obtenir une représentation 3D d'un produit, qui permet une analyse de la forme, des dimensions, de l'intégration des facteurs humains et de la faisabilité générale. En accord avec Schaaf, Garcia et al. [77] du Ministère de la défense américaine, définissent le prototype virtuel comme la simulation informatique d'un système ayant un degré de réalisme fonctionnel aussi élevé que celui d'un prototype physique. Ils définissent aussi le prototypage virtuel comme étant "Le processus utilisant un prototype virtuel, à la place d'un prototype physique, pour tester et évaluer les caractéristiques spécifiques d'un concept".

Le prototypage virtuel a été défini par Kerttula comme étant un processus dans lequel un produit ou un concept de produit et ses fonctionnalités sont simulés de manière aussi réaliste que possible, à l'aide des outils de RV [105].

Pour Fuchs [76], le prototype virtuel est une représentation avec laquelle l'utilisateur peut interagir. Ce dernier peut s'immerger dans cette représentation par l'intermédiaire de dispositifs de RV, l'utilisateur est donc actif. De plus, une modélisation physique de la scène et une modélisation comportementale des objets sont utilisées.

Le prototype virtuel est la représentation complète du futur produit, une évaluation uniquement visuelle de celui-ci est donc insuffisante. Il est essentiel de pouvoir réaliser une

évaluation tactile et fonctionnelle du prototype virtuel. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des interfaces de RV telles que des gants de données ou des systèmes à retour d'effort.

Tuikka a présenté un exemple d'environnement de prototypage virtuel, comprenant un système à retour d'effort, des lunettes stéréoscopiques, des gants de données et des traqueurs de position magnétique et acoustique (Figure N° 51). Cet environnement permet aux utilisateurs d'évaluer les caractéristiques et les fonctionnalités d'un concept de téléphone mobile [192].

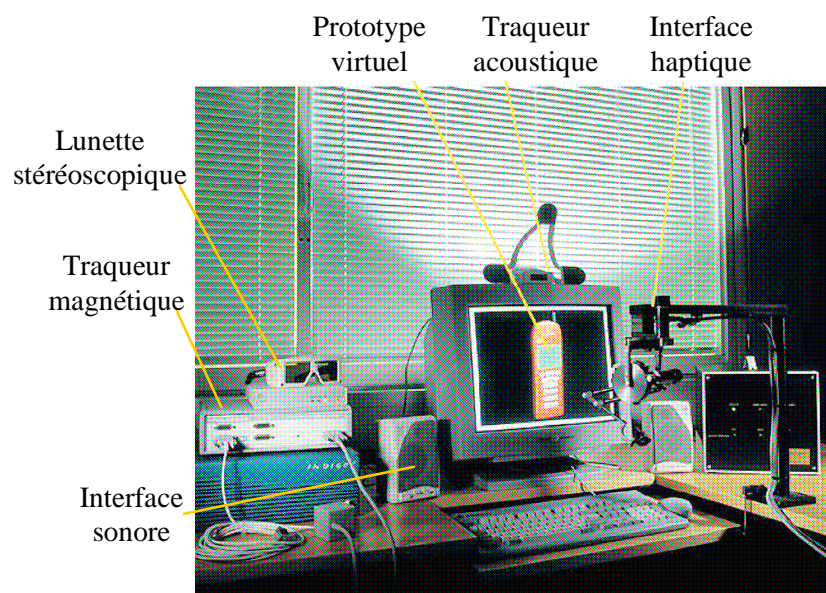


Figure N° 51. Prototype virtuel de téléphone mobile [192]

Plusieurs études dont celles citées précédemment ont montré le potentiel du prototypage virtuel en conception de produits [197]. Le Prototype Virtuel (PV) permet aux concepteurs d'évaluer les caractéristiques et les fonctionnalités du futur produit, grâce à une interaction multimodale et une immersion multisensorielle, simulant la réalité. Certains chercheurs sont même convaincus que le PV remplacera à terme le Prototype Physique (PP) [78]. Selon Andriot [6], le prototypage virtuel n'est en fait que la partie amont d'un processus de gestion du cycle de vie d'un produit qui prend en compte toutes les contraintes de fabrication, d'utilisation et de maintenance du produit. Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation du PV pour l'évaluation de produit, du point de vue fonctionnel, ergonomique ou esthétique. Bennett [14] a montré comment l'utilisation du PV peut aider dans les différentes phases de conception d'un produit complexe en aéronautique. Rooks [161] a décrit l'utilisation du PV pour découvrir les erreurs d'assemblage dans les phases amonts du processus de

conception. Colombo et al. [45] ont utilisé un PV pour évaluer l'ergonomie de tableaux de bord de voitures. D'autres études se sont intéressées à l'utilisation du PV pour des tâches de montage et de démontage virtuel [94, 179].

Néanmoins, le prototype virtuel est à ce jour très peu utilisé en conception de produits, dans les entreprises. Les concepteurs préfèrent utiliser des maquettes virtuelles pour évaluer visuellement le futur produit. Ensuite, ils réalisent des prototypes physiques juste avant le lancement de la production afin d'évaluer toutes les caractéristiques et les fonctionnalités de leur produit.

3.5.2 Utilisations des représentations de produits dans l'industrie

Traditionnellement dans les entreprises, l'évaluation de produit était réalisée par l'équipe de conception, à l'aide de représentations physiques. Cependant, il était difficile de faire des modifications sur une représentation telle qu'une maquette ou un prototype physique. De plus, réaliser plusieurs représentations physiques était très onéreux.

Depuis les deux dernières décennies, les ordinateurs sont devenus assez performants pour permettre aux entreprises de se tourner vers les représentations intermédiaires virtuelles. Celles-ci ont permis d'accroître la qualité des nouveaux produits tout en réduisant leur coût et leur temps de développement.

Dans le domaine de l'automobile, Renault s'est associé avec le CNRS en mai 2005, pour créer une unité de recherche commune : le Laboratoire de Perception et Contrôle du Mouvement en environnement Virtuel (LPCM). Cette unité de recherche est chargée d'étudier les mécanismes de perception et d'interprétation de l'environnement par les conducteurs. L'objectif des chercheurs est de comprendre les liens qu'établit un individu en situation de conduite avec l'espace qui l'entoure. Entièrement menés sur des représentations virtuelles de véhicules Renault, les programmes d'études portent notamment sur les sensations de déplacement : vitesse d'accélération et de freinage. Les chercheurs s'attachent également à l'environnement proche du conducteur, et particulièrement à sa perception de l'habitacle [156].

PSA Peugeot Citroën a inauguré en octobre 2004, un nouveau Centre de Design, baptisé Automotive Design Network. D'une surface de 70 000 m², il dispose notamment d'un Centre de Réalité Virtuelle de 500m², doté des outils de simulations numériques les plus

avancés de l'industrie automobile (CaveTM, Holobench, écrans échelle 1...). La réalité virtuelle et plus spécifiquement les représentations virtuelles ont permis de réduire les délais, maîtriser les coûts, multiplier le nombre de solutions étudiées, diversifier les gammes de véhicules et intégrer plus rapidement les innovations technologiques. Depuis 1999, plus de 7.5 millions d'euros ont été investis par PSA Peugeot Citroën dans ce domaine [155].

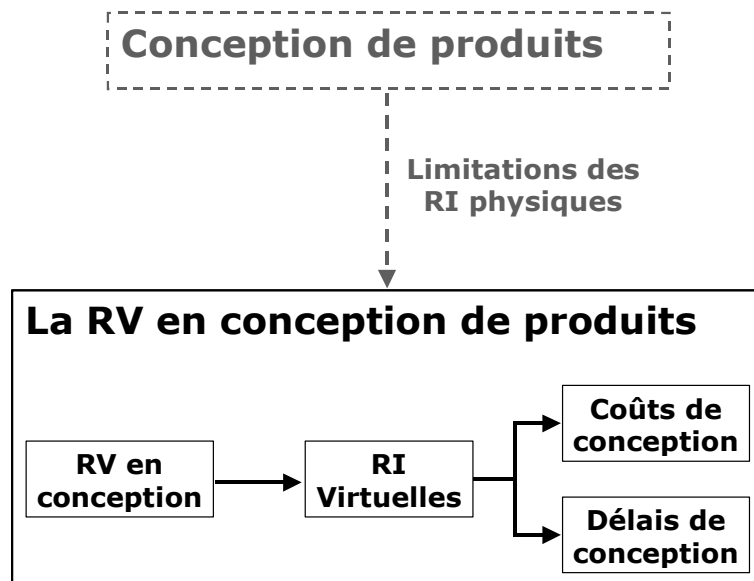
En aéronautique, citons l'A380 d'Airbus et le Falcon 7X de Dassault Systèmes qui ont eu recours aux représentations intermédiaires virtuelles tout au long de leur processus de conception [2, 56].

Fonctions	Besoins
Simulation de l'Homme	Mannequins virtuels réalistes, simulations de tâches (ouverture de portes, saisie de pièces, transport, vissage), retour physique (cinématiques des objets, simulation de la charge)
Lisibilité	Représentations graphiques, mesures possibles
Accessibilité	Visualisation des espaces, résultats
Dépose / Installation	Contraintes (encombrement), trajectoires (collisions, proximité), représentation des objets (cinématiques, caractéristiques de type déformable ou autres), prise en compte de l'homme
Transportabilité	Respect de la sécurité, dimensionnement des espaces
Contrôlabilité	Durée d'intervention, outils d'exploration
Réparabilité	Durée d'intervention, nombre de personnes requises
Service au sol	Durée d'intervention, simulation des véhicules d'intervention
Autres	Visualisation des flux ou du fonctionnement des systèmes, cas limites et pannes

Tableau N° 7. Besoins en représentations virtuelles dans le domaine des opérations de maintenance chez Airbus [3]

Dans un tout autre domaine, EDF développe des applications de réalité virtuelle, principalement pour les centrales nucléaires, et plus particulièrement pour les interventions de maintenance et les campagnes de communication. Des représentations virtuelles d'environnements (terrains, bâtiments, matériels...) sont utilisées pour immerger l'utilisateur et tester des scénarios d'enchaînements d'actions (manutention d'objets par exemple). Ces scénarios sont ensuite appliqués en réel si les tests virtuels sont concluants. De cette façon, les risques sont mieux anticipés [68].

3.5.3 Synthèse



Nous avons vu que pour palier aux problèmes de conception liés à l'utilisation des représentations intermédiaires physiques, la RV semble être une solution intéressante. Les représentations intermédiaires virtuelles permettent en particulier de réduire les coûts et les délais de conception des nouveaux produits.

3.6 Les limitations de la RV en conception

La RV semble être un outil très intéressant dans la recherche de représentation du futur produit. L'utilité de la RV se manifeste surtout dans le test et l'évaluation des choix de conception, c'est un outil d'aide à la décision. De cette manière, elle permet au concepteur de valider ou de modifier ses hypothèses de conception plus rapidement et à moindre coût.

Cependant, selon Dorta, la RV comporte une série de problèmes qui affectent le processus de conception, surtout lors des premières phases [64].

- La nécessité de travailler avec une certaine précision dans les mesures ;
- Le manque d'ambiguïté à l'intérieur de la représentation, qui offre des formes très définies et peut ainsi fermer la porte à d'autres solutions ;
- Le changement de mode d'interaction avec la représentation virtuelle. Passer du crayon aux interfaces de RV peut être perturbant pour le concepteur ;

- Les besoins importants en puissance de calcul qui limitent les détails et la complexité des projets, affectant ainsi le temps réel et la sensation de présence.

Dorta signale aussi certains effets potentiellement négatifs dû à l'utilisation de la RV en conception.

- **L'aspect esthétique du projet au détriment du concept :** le concepteur peut fausser son travail de conception en étudiant exclusivement l'aspect esthétique des composants du projet. Il est donc possible de ne pas donner toute l'importance nécessaire aux aspects de base, comme le concept générateur ou les facteurs de coûts ;
- **L'éloignement de la réalité :** Le travail de conception exclusif avec l'outil qu'est la RV peut diminuer l'expérience d'une perception physique du produit. La RV sert grandement à la perception de certains aspects du projet, mais un travail avec ce seul outil pour percevoir des éléments du projet peut éloigner le concepteur de la réalité du projet et même de la réalité du problème ;
- **La dépendance progressive et totale du concepteur envers la machine :** Les caractéristiques de la visualisation obtenue avec la RV peuvent générer une dépendance. Déjà plusieurs activités du processus de conception comme la réalisation des dessins ou la gestion des données sont dépendantes de l'utilisation de l'ordinateur. Une dépendance totale du concepteur envers l'ordinateur dans le processus de conception peut par exemple affecter ses habiletés de compréhension et d'abstraction spatiale ;
- **La possibilité d'altérer la réalité du projet :** La RV peut être employée pour altérer et déformer la réalité du projet. Les concepteurs peuvent ainsi créer une fantaisie par l'usage d'éléments spéculatifs à l'intérieur de cette réalité virtuelle et ainsi fausser l'opinion du client ou de l'utilisateur du projet.

La Réalité Virtuelle est toutefois en mesure d'apporter l'environnement immersif, temps réel et interactif requis, pour les revues de projets des métiers de la conception. En revanche, l'utilisation de la réalité virtuelle impose une préparation des données. Cette préparation est soit intégrée dans le logiciel natif, soit effectuée par un autre logiciel.

Dans le premier cas, les solutions offertes ne sont pas satisfaisantes, pour des raisons de qualité visuelle, d'interactivité avec la scène ou de coûts de mise en place du système. En effet, les modèles numériques issus de la CAO sont définis de manière exacte car les surfaces sont générées par des équations mathématiques. Or, ce type de modèle n'est absolument pas compatible avec les logiciels de réalité virtuelle, qui pour fonctionner en temps réel, ne peuvent pas gérer ce type de représentation. Les modèles doivent être convertis en modèles virtuels. Dans le second cas, la préparation des données permet d'avoir un meilleur contrôle sur la qualité du résultat finale. Cependant, cette préparation est souvent lourde, longue et fastidieuse. De plus, il est nécessaire de réaliser un certain nombre de va-et-vient entre le modèle CAO et le modèle virtuel, ce qui ne favorise pas la réactivité au sein de l'équipe de conception.

3.7 Conclusion

Comme nous l'avons vu précédemment, la RV est de plus en plus utilisée en conception. Les avantages de cette nouvelle technologie sont incontestables. La réalité virtuelle est utilisée tout au long du processus de conception, mais elle est particulièrement utile dans les phases d'évaluation du produit, comme outil d'aide à la décision. Elle permet ainsi d'évaluer l'esthétique, l'ergonomie, la performance, les fonctionnalités et la faisabilité du nouveau produit. L'utilisation de la RV et plus particulièrement des représentations intermédiaires virtuelles permet une meilleure connaissance du produit, plus rapidement et à moindre coût. Elle permet aux concepteurs de faire valoir leurs critères au plus tôt et d'éviter ainsi d'attendre la réalisation tardive de maquettes ou prototypes physiques.

Nous avons vu que pour palier aux problèmes de coûts et délais de conception liés à l'utilisation des RI physiques, la RV semble être une solution intéressante. Plus particulièrement, les RI virtuelles permettent de réduire les coûts et les délais de conception des nouveaux produits. Cependant, la conception d'un produit innovant s'inscrit généralement dans le triptyque coût-délais-qualité (Figure N° 52). Nous avons montré dans le troisième chapitre que les RI virtuelles permettent de réduire les coûts et les délais de conception. Mais qu'en est-il de la qualité de l'évaluation ? Notre problématique porte précisément sur cette question.

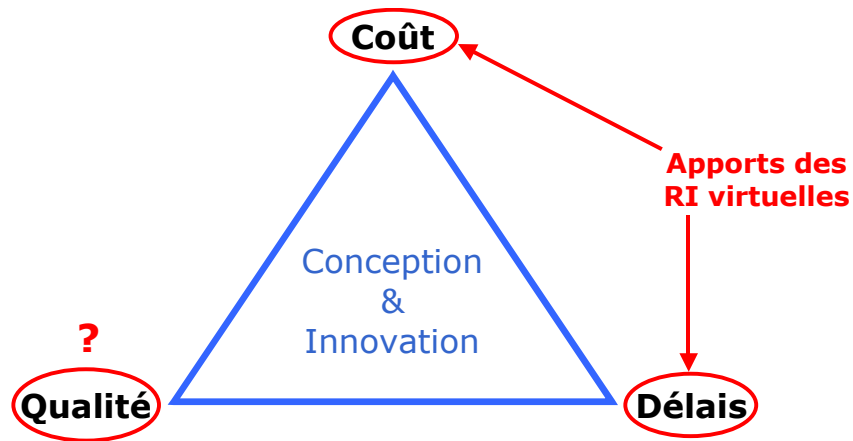


Figure N° 52. Coût-Délais-Qualité

Nous avons donc comparé les RI virtuelles et les RI physiques pour l'évaluation de produits, afin de répondre à notre problématique de recherche :

Les RI virtuelles sont-elles substituables ou complémentaires aux RI physiques ?

Les représentations virtuelles sont souvent utilisées avec pour objectif de remplacer les représentations intermédiaires physiques. Cependant, il existe à ce jour assez peu d'études portant sur ce sujet. A travers nos expérimentations, nous cherchons à déterminer les avantages et les inconvénients des représentations intermédiaires virtuelles par rapport aux représentations intermédiaires physiques.

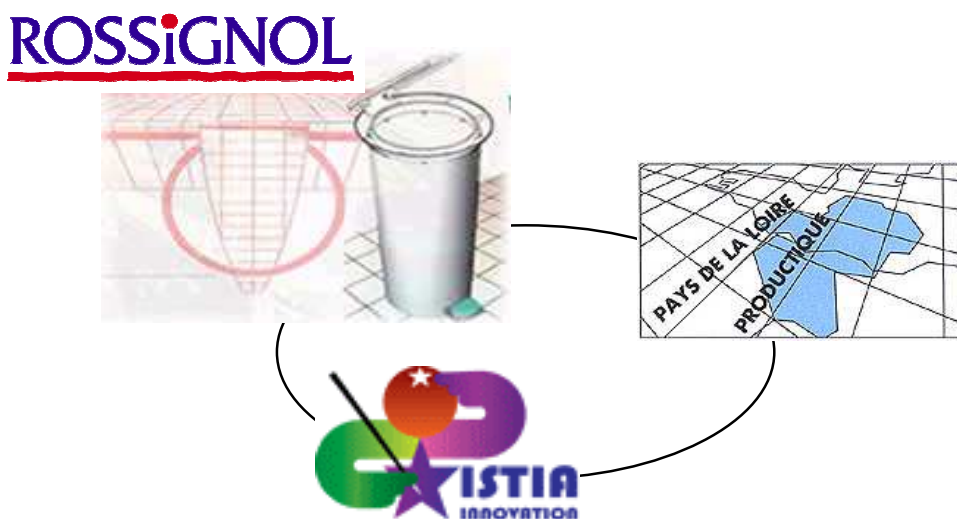
4 Expérimentations

4.1 Contexte industriel et scientifique

4.1.1 L'entreprise ROSSIGNOL S.A.

Notre travail de thèse s'est déroulé en collaboration avec le CRITT Productique Pays de la Loire et la société ROSSIGNOL S.A. qui nous a fourni notre terrain d'expérimentation. Les représentations intermédiaires qui sont au cœur de notre recherche, sont un réservoir d'innovation. Elles permettent une réflexion sur les futures fonctions des prochaines générations de produits. Cette réflexion se situe très en amont dans le processus de conception.

ROSSIGNOL S.A. est une moyenne entreprise de 230 salariés située à Montsûrs dans l'ouest de la France. Son statut juridique est une Société Anonyme au capital de 3 359 910 €. Elle fabrique et commercialise du matériel pour l'hygiène, la propreté, l'équipement et la décoration des sanitaires publics et privés. La structure de l'activité est orientée sur la particularité de ses marchés qu'elle découpe en deux grands ensembles : une partie professionnelle et une partie grand public. Cette distinction est due à la différence de besoins et de réseaux de distribution entre les deux marchés. L'entreprise se base sur un savoir faire de transformation de feuilles métalliques, de traitement de surface, d'assemblage et de montage de composants et de conditionnement de produits finis.



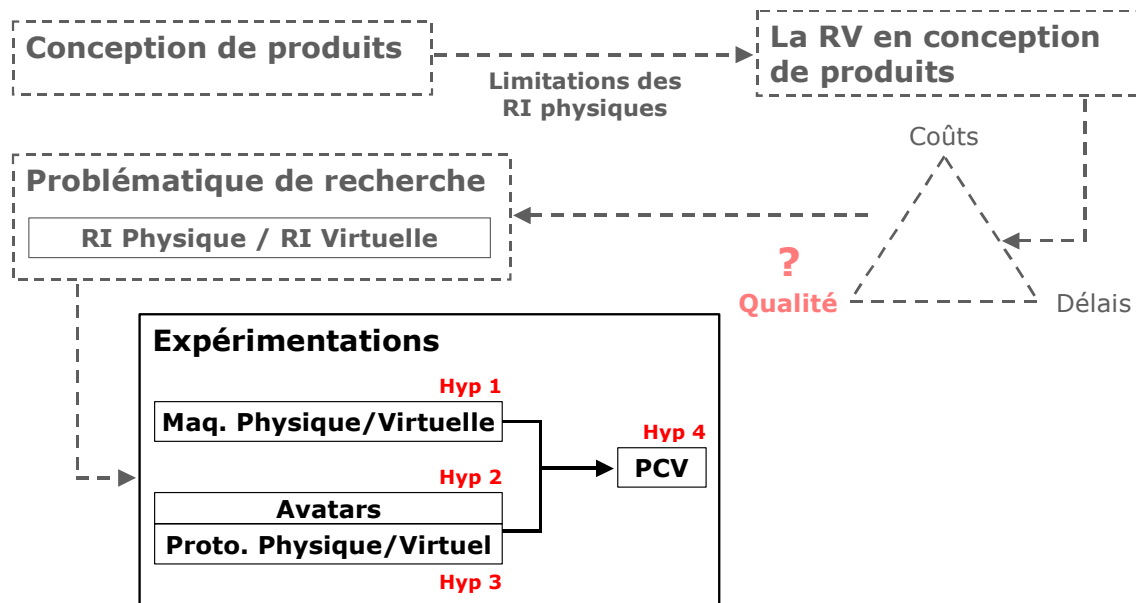
4.1.2 L'approche

Notre recherche porte, entre autres, sur la comparaison des représentations intermédiaires virtuelles, comme outil d'évaluation du futur produit, par rapport aux outils traditionnels tels que la maquette ou le prototype physique. Notre étude explore ainsi les enjeux de la RV dans les phases amonts du processus de conception de produits. Il ne s'agit pas d'une démonstration des apports seulement positifs de la RV. Il s'agit d'un travail de recherche exploratoire qui vise à dévoiler les implications tant positives que négatives de l'usage de la RV, comme outil d'évaluation de produits.

Pour répondre à notre problématique de recherche, nous avons réalisé quatre expérimentations. La première expérimentation a pour objectifs de comparer l'utilisation d'une maquette physique et d'une maquette virtuelle pour l'évaluation visuelle de produits. 30 participants ont pris part à cette expérimentation. La seconde expérimentation a pour objectif d'étudier les influences de l'apparence des avatars lors de la manipulation d'objets virtuels. Ces avatars sont nécessaires à l'évaluation de prototypes virtuels. 52 participants ont pris part à cette expérimentation. La troisième expérimentation a pour objectif de comparer l'utilisation d'un prototype physique et d'un prototype virtuel pour l'évaluation d'un produit. 30 participants ont pris part à cette expérimentation. Enfin, les résultats des trois premières expérimentations nous ont amené à proposer une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle : Le Produit Concept Virtuel (PCV). Dans la quatrième expérimentation nous étudions les apports de ce PCV lors d'un projet de conception d'un nouveau produit. 24 participants ont pris part à cette expérimentation.

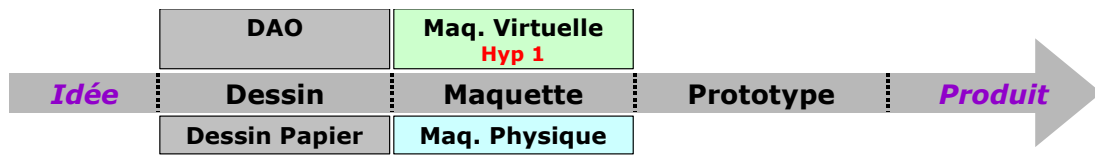
4.1.3 Hypothèses de recherche

A travers nos expérimentations, nous avons cherché à déterminer les avantages et les inconvénients des représentations intermédiaires virtuelles par rapport aux représentations intermédiaires physiques. Les expérimentations réalisées nous ont permis de valider nos quatre hypothèses de recherche :



1. La 1ère hypothèse concerne la maquette physique et la maquette virtuelle (Expérimentation 1). Nous posons l'hypothèse que la maquette virtuelle est substituable à la maquette physique pour l'évaluation de produits ;
2. La 2ème hypothèse concerne l'influences des avatars (Expérimentation 2). Nous posons l'hypothèse que les avatars qui sont nécessaires à l'évaluation de prototypes virtuels, peuvent influencer le comportement des utilisateurs et donc influencer l'évaluation du prototype virtuel ;
3. La 3ème hypothèse concerne le Prototype Physique et le Prototype Virtuel (Expérimentation 3). Nous posons l'hypothèse que le prototype virtuel n'est pas substituable au prototype physique pour l'évaluation de produits ;
4. La 4ème hypothèse concerne le Produit Concept Virtuel (Expérimentation 4). Le Produit Concept Virtuel (PCV) est une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle évolutive, qui permet l'évaluation de concepts de produits. Le PCV peut ainsi être utilisé tout au long des phases amonts du processus de conception.

4.2 Expérimentation 1 "Maquette Physique / Maquette Virtuelle"



4.2.1 Contexte et Objectifs

Parmi les difficultés relatives à la conception d'un nouveau produit, les délais et les coûts de conception occupent une place importante. Ces problèmes se posent non seulement dans les grandes industries, mais également dans les petites et moyennes entreprises. Ils peuvent être attribués en partie à la nécessité de multiples itérations de réalisation et d'évaluation de représentations intermédiaires physiques et d'environnements de tests réels. Nous avons vu dans l'état de l'art que les maquettes sont fréquemment utilisées par les concepteurs pour percevoir les propriétés visuelles du futur produit. En plus de cette possibilité d'évaluer visuellement le produit, les maquettes permettent de confronter les points de vue des différents membres de l'équipe de conception.

Comme la maquette physique, la maquette virtuelle permet une évaluation visuelle du futur produit. Mais contrairement à la maquette physique, elle permet aussi une navigation à l'intérieur du produit. La maquette virtuelle permet de disposer d'une représentation du futur produit à la fois intégrale, à jour et portable. Cela facilite le travail en équipe des concepteurs et permet d'économiser des matériaux, du temps et de l'argent. Nous avons observé dans l'état de l'art que la maquette virtuelle est utilisée avec succès dans l'industrie et qu'elle est parfois utilisée en remplacement de la maquette physique.

Cette expérimentation a été réalisée dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise ROSSIGNOL SA, spécialisée dans les collecteurs de déchets et l'équipement sanitaire. Elle a pour but de comparer l'utilisation de ces deux représentations intermédiaires pour l'évaluation de produits. Nous voulons par cette expérimentation, vérifier que la maquette virtuelle peut effectivement remplacer la maquette physique pour l'évaluation visuelle de produits. Pour cela, des maquettes physiques de collecteurs de déchets de cuisine, de ville et de salle de bain sont évaluées visuellement selon plusieurs critères. Ensuite, des maquettes virtuelles des mêmes produits sont évaluées selon les mêmes critères (Figure N° 53).



Figure N° 53. Maquettes Physiques (à gauche) et Maquettes Virtuelles (à droite)

4.2.2 Participants

Quinze participants âgés de 20 à 26 ans (Moyenne=22.5; Écart Type=1.9) ont pris part à l'évaluation des maquettes physiques. Il y a 4 femmes et 11 hommes. Les participants n'ont aucunes connaissances des objectifs de cette expérimentation.

Quinze nouveaux participants âgés de 21 à 30 ans (Moyenne=23.2; Écart Type=2.5) ont pris part à l'évaluation des maquettes virtuelles. Il y a 7 femmes et 8 hommes. Les participants n'ont aucunes compétences en matière de RV et n'ont pas connaissance des objectifs de cette expérimentation.

4.2.3 Dispositifs Expérimentaux

Le rendu visuel est réalisé à échelle 1 sur un écran immersif de 2,5 mètres de hauteur et 3 mètres de largeur (Figure N° 54). Pour l'évaluation des maquettes physiques, différents environnements virtuels sont projetés sur l'écran immersif et les maquettes physiques correspondantes sont placées devant l'écran, afin que les participants puissent avoir à la fois l'écran et la maquette physique dans leur champ de vision. Pour l'évaluation des maquettes virtuelles, les mêmes environnements virtuels sont projetés sur l'écran immersif, mais les maquettes virtuelles sont intégrées dans leur environnement virtuel respectif.

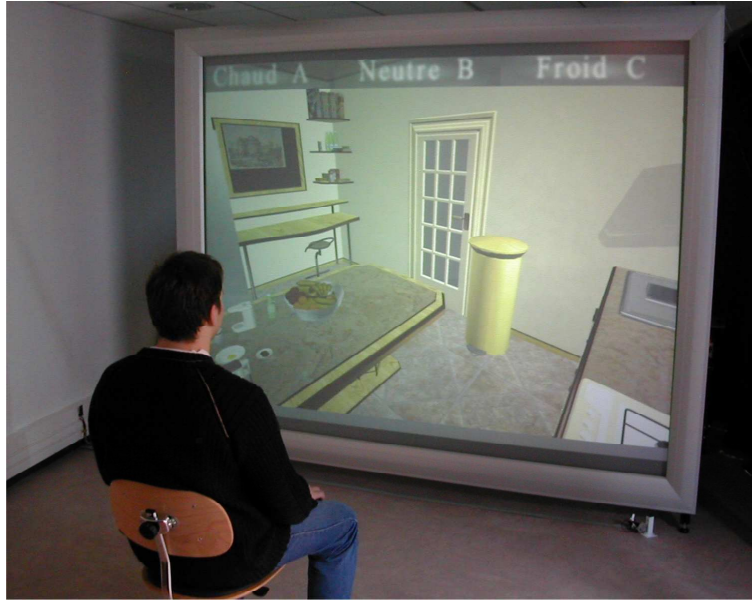


Figure N° 54. Dispositifs expérimentaux

4.2.4 Procédure

Pour évaluer les maquettes de collecteur, les participants sont isolés dans une pièce afin d'être préservés d'éventuelles influences extérieures et d'accroître ainsi leur concentration. Les participants ont comme seule consigne d'évaluer les maquettes, ils ne soupçonnent pas la finalité de cette expérimentation. De plus, une fois que le participant a terminé son évaluation et a commencé à remplir le questionnaire, il n'a plus accès aux maquettes et aux environnements virtuels.

Les participants sont assis à 2 m de l'écran, en lui faisant face (Figure N° 54). Chaque participant doit évaluer visuellement trois maquettes virtuelles ou trois maquettes physiques. Les participants n'ont aucune interaction avec les maquettes et les environnements, ils ne sont qu'observateurs. L'expérimentation se déroule en deux phases, une phase de navigation dans l'environnement virtuel et une phase de visualisation des différentes ambiances des EV. Cela permet aux participants d'évaluer les caractéristiques visuelles des maquettes et des EV. Les participants peuvent ainsi évaluer l'adéquation entre la maquette et les différentes ambiances de son EV.

L'évaluation concerne trois collecteurs différents et leur EV respectif (Figure N° 55). Il y a un collecteur de déchets de cuisine, un collecteur de déchets de salle de bain et un

collecteur de déchets à usage urbain. Les environnements virtuels de cuisine et salle de bain sont déclinés en trois ambiances différentes, chaude, neutre et froide (Figure N° 56).



Figure N° 55. Trois environnements (cuisine, salle de bain et ville)

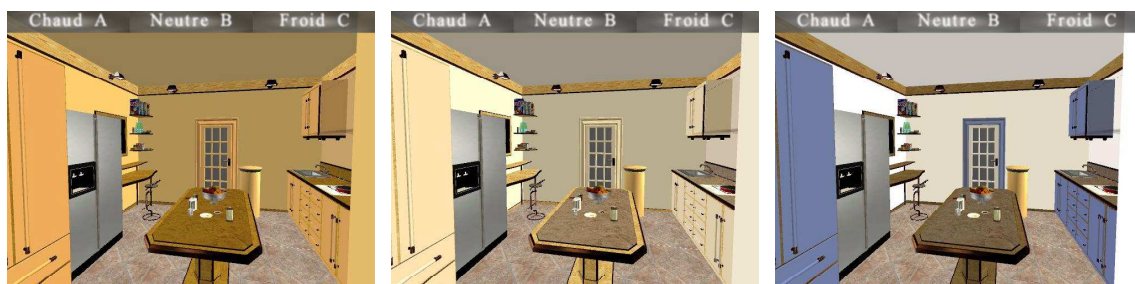


Figure N° 56. Trois ambiances (chaude, neutre et froide)

4.2.5 Données collectées

Les données sont collectées sous forme d'un questionnaire remis à chaque participant. Le questionnaire a été réalisé conformément à la méthode SDM (Annexe N° 3) [139] et en accord avec les concepteurs de l'entreprise ROSSIGNOL S.A. Les questions portent sur les caractéristiques visuelles (forme, couleur, encombrement) des maquettes et sur leur adéquation avec leur EV respectif.

4.2.6 Résultats

Le Tableau N° 8 présente les notes moyennes sur dix que les participants ont attribué par critères d'évaluation, selon le type de maquette évaluée.

Maquette	Collecteur de cuisine					
	Encombrement	Couleur	Forme	Ambiance neutre	Ambiance chaude	Ambiance froide
Physique	<u>7,10</u>	7,73	7,03	8,23	5,00	6,20
Virtuelle	<u>4,43</u>	8,00	7,13	8,67	4,50	5,73
	Collecteur de salle de bain					
	Encombrement	Couleur	Forme	Ambiance neutre	Ambiance chaude	Ambiance froide
Physique	9,33	8,07	8,17	8,60	4,33	7,00
Virtuelle	8,70	7,63	7,50	8,20	4,83	7,23
	Collecteur urbain					
	Encombrement	Couleur	Forme	Environnement		
Physique	8,50	8,27	7,67	7,33		
Virtuelle	8,17	7,63	7,50	7,09		

Tableau N° 8. Notes moyennes par critère d'évaluation et par type de maquette

Nous avons ensuite réalisé une Analyse de la Variance ANOVA (Annexe N° 2.1) pour chaque critère d'évaluation afin de déterminer s'il y a des différences statistiquement significatives. Nous avons observé une seule différence significative qui concerne l'évaluation de l'encombrement de la maquette de collecteur de cuisine ($p(F=0.20) < 0.004$; $p(t=5.7) < 0.000004$). Le double histogramme de la Figure N° 57 permet de comparer les deux échantillons positionnés côte à côte. L'histogramme pour les maquettes physiques est affiché au-dessus de la ligne horizontale et celui pour les maquettes virtuelles est affiché au-dessous de la ligne horizontale. Nous constatons que les formes des deux distributions sont complètement différentes, avec un décalage de la loi pour les maquettes physiques vers la droite et un décalage de la loi pour les maquettes virtuelles vers la gauche. Les boîtes à moustaches pour les deux échantillons (Figure N° 58) sont également très différentes. Ce graphique montre un décalage de la valeur centrale de la distribution pour les maquettes physiques vers la droite de celle pour les maquettes virtuelles. Il y a ensuite une étendue des données pour les maquettes virtuelles plus grande que celle pour les maquettes physiques. Enfin, nous ne constatons aucun chevauchement des médianes, ce qui laisse apparaître une différence statistiquement significative entre les valeurs centrales de ceux deux échantillons.

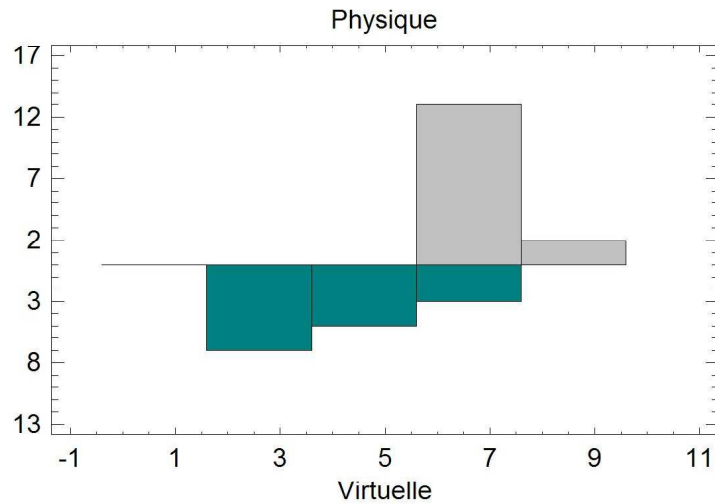


Figure N° 57. Double histogramme des 2 maquettes Physique/Virtuelle

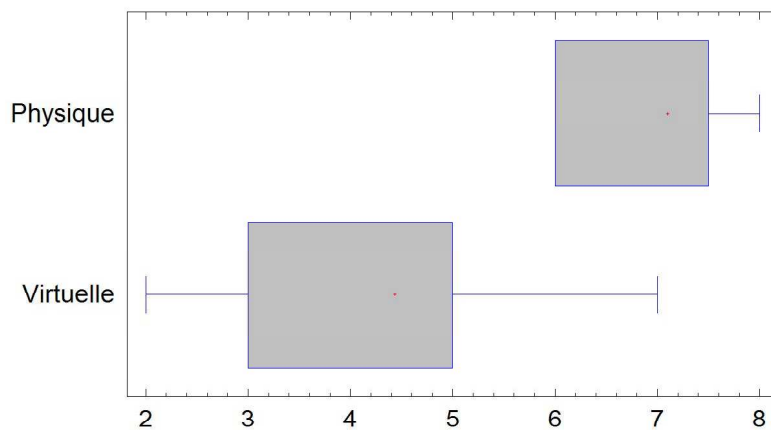


Figure N° 58. Boîtes à moustaches des 2 maquettes Physique/Virtuelle

4.2.7 Analyse des résultats

Les résultats de cette expérimentation nous laissent penser que les maquettes virtuelles sont substituables aux maquettes physiques, pour l'évaluation visuelle de nos collecteurs de déchets. Nous avons aussi observé qu'il est parfois préférable d'utiliser une maquette virtuelle pour évaluer certains aspects du produit tel que son encombrement.

En effet, la seule différence qui a été constatée, concerne l'évaluation de l'encombrement de la maquette de collecteur de cuisine. Les participants qui ont utilisé la maquette physique sont satisfaits de l'encombrement du collecteur de cuisine. Alors que les participants qui ont utilisé la maquette virtuelle ont estimé que le collecteur est beaucoup trop encombrant pour ce type de cuisine. Cette différence s'explique probablement par le fait que

les maquettes virtuelles étaient intégrées dans leur EV respectif, ce qui n'était pas le cas pour les maquettes physiques. Il est en effet plus facile de se rendre compte de l'encombrement du collecteur, lorsque celui-ci est intégré dans son environnement virtuel.

4.2.8 Conclusion

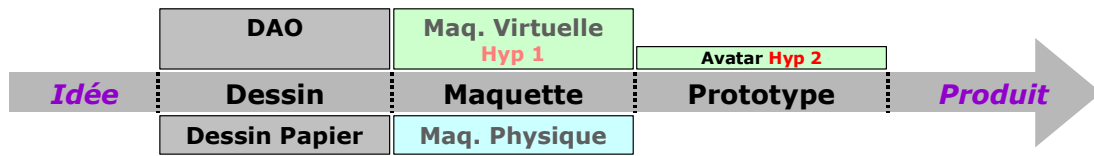
Cette expérimentation a pour but de comparer l'utilisation de la maquette physique et de la maquette virtuelle, pour l'évaluation de produits. Notre étude a pour objectif de vérifier que la maquette virtuelle peut effectivement remplacer la maquette physique. Pour cela, nous avons fait évaluer trois types de collecteurs de déchet dans leurs environnements respectifs (cuisine, salle de bain et ville). Un premier groupe de participants a évalué des maquettes physiques de ces collecteurs et un second groupe a évalué des maquettes virtuelles de ces mêmes produits, selon les mêmes critères.

Les résultats ne révèlent qu'une seule différence significative entre les deux évaluations, qui est à l'avantage de la maquette virtuelle. Cet avantage est dû au fait que la maquette virtuelle est intégrée dans son environnement virtuel, ce qui permet d'évaluer plus facilement l'encombrement du collecteur par rapport à son environnement. Ce résultat a par ailleurs été confirmé par les retours des utilisateurs qui ont acheté ce produit.

Nos résultats suggèrent donc que la maquette virtuelle est susceptible de remplacer la maquette physique, pour l'évaluation visuelle d'un produit (dimension, forme et couleur). La maquette virtuelle se montre même parfois supérieure à la maquette physique, car le futur produit peut facilement être intégré dans son EV. Cela permet de mieux se rendre compte de son encombrement et de son adéquation à son futur environnement. Avec la maquette virtuelle, les concepteurs disposent d'un outil performant, qui leur permet également de faire des économies de temps et d'argent.

Cette première expérimentation semble ainsi valider notre première hypothèse de recherche, d'après laquelle la maquette virtuelle est substituable à la maquette physique pour l'évaluation visuelle de produits, dans le cadre des choix expérimentaux qui ont été faits. L'expérimentation suivante a pour objectif de valider notre seconde hypothèse de recherche, selon laquelle l'apparence visuelle des avatars nécessaires à la manipulation de prototypes virtuels, peut avoir une influence sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel.

4.3 Expérimentation 2 "Influences des Avatars"



4.3.1 Contexte

Nous avons vu précédemment que la différence majeure entre une maquette virtuelle et un prototype virtuel réside dans le fait qu'il est possible d'interagir de façon multimodale avec un prototype virtuel. Pour pouvoir assurer une interaction telle que la manipulation d'un prototype virtuel et à fortiori pour une manipulation avec retour d'effort, il est nécessaire que l'utilisateur soit représenté par un avatar dans l'EV. Cependant, très peu d'études ont été menées concernant l'influence des avatars sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel. Les avatars sont couramment utilisés pour l'évaluation de prototypes virtuels. Si les avatars ont effectivement une influence sur le comportement des utilisateurs, cette influence est susceptible de fausser l'évaluation de prototypes virtuels.

En conséquence, préalablement à notre expérimentation sur les prototypes virtuels, nous avons mené une étude afin de nous assurer que les utilisateurs puissent évaluer le prototype virtuel sans être influencé par leur avatar. Dans cette étude, trois expériences sont conduites pour étudier l'influence de l'apparence visuelle des avatars sur la manipulation d'objets virtuels et d'interfaces d'interaction réelles en EV. Le terme avatar désigne ici la représentation graphique de l'utilisateur dans un EV, lorsqu'il manipule un objet virtuel.

4.3.2 Les Avatars

Nous avons vu dans les chapitres précédents que, l'évaluation multisensorielle d'une représentation virtuelle nécessite une interaction multimodale, permise par l'utilisation d'interfaces de réalité virtuelle et de techniques d'interactions. Cependant, pour assurer des interactions telles que la sélection et la manipulation d'un objet virtuel, il est nécessaire que l'utilisateur soit représenté par un avatar dans l'environnement virtuel. De plus, il faut s'assurer que cet avatar ne fausse pas l'évaluation.

4.3.2.1 Qu'est ce qu'un avatar ?

Quelques études pionnières ont tenté de répondre aux questions suivantes: Qu'est ce qu'un avatar ? Et à quoi sert un avatar ?

Le terme "avatar" provient du mot Sanskrit "avatāra", qui signifie "descente". Ce terme a été employé à l'origine dans la religion hindoue, pour désigner les incarnations du dieu Vishnu. Un avatar est un dieu à forme humaine, il s'incarne dans un corps humain lorsque la religion décline et l'immoralité croît. Il a pour but de combattre le mal et d'aider l'humanité à élever son niveau de conscience. Rama et Krishna sont les plus connus des avatars, Bouddha est aussi considéré comme un avatar [79]. Le terme "avatar" a ensuite été repris en informatique pour désigner la représentation virtuelle d'un utilisateur. Une des premières fois où ce terme a été utilisé dans ce sens, fut dans le jeu vidéo "Ultima IV" [194]. Les jeux vidéos réalisés par la suite ont conservé cette définition du mot "avatar". Plus tard, ce terme a désigné les personnages des jeux de rôle, tels que "Habitat" [86] et "Shadowrun" [175]. Stephenson [183] a popularisé le terme "avatar" dans son roman "Snow Crash", où ce terme a été utilisé pour décrire la représentation virtuelle d'un être humain dans le Metaverse. Le Metaverse est un monde virtuel où les avatars évoluent, de la même façon que les êtres humains évoluent dans le monde réel. Dans le Metaverse, le statut social des utilisateurs est déterminé par la qualité de leur avatar.

Dans le cadre de notre recherche, nous définissons l'avatar comme étant un objet virtuel, d'apparence non définie, qui représente l'utilisateur dans un environnement virtuel.

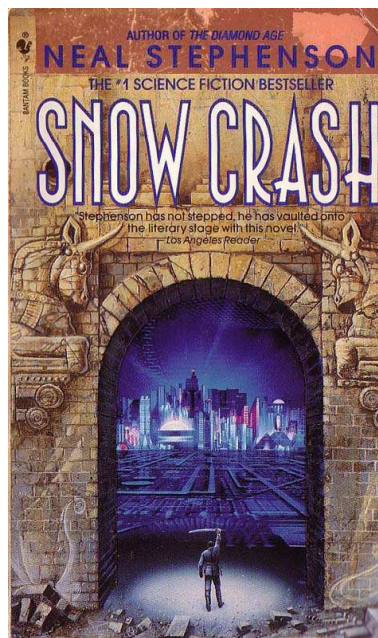


Figure N° 59. Snow Crash, de Neal Stephenson

4.3.2.2 Apparences et utilisations des avatars

De nombreuses études sur les EV ont utilisé des avatars aux apparences diverses, pour représenter les utilisateurs. Les avatars utilisés ont généralement la forme d'un corps humain ou d'une partie de corps humain, tels qu'une tête ou des mains. Ils peuvent aussi prendre l'apparence d'un animal ou d'un simple curseur. Les avatars sont très souvent utilisés pour communiquer dans les Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC). Leung et Chen [119] ont développé un EVC appelé NetICE, permettant aux participants distants géographiquement de collaborer comme s'ils étaient au même endroit. Dans cet EVC, chaque participant est représenté par un avatar qui a la forme d'un corps humain, ayant un visage très réaliste. Luciano et Banerjee [124] ont eux conçu un EVC permettant aux utilisateurs de réaliser, ensemble, des tâches de manipulation. Les utilisateurs sont représentés par des avatars à forme humaine, mais qui ne sont constitués que d'une tête, d'un torse et de deux bras. Dans la plupart des études, les avatars à forme humaine sont utilisés pour humaniser la communication entre les utilisateurs d'un EVC [162, 173]. Certaines études ont également souligné que pour humaniser la communication, les avatars à forme humaine doivent présenter des expressions du visage réalistes, permettant ainsi d'exprimer différentes émotions [115, 118, 180]. DiPaola et Collins [61] ont montré que même lorsque l'avatar possède une tête représentant un animal, les expressions du visage sont importantes pour favoriser la communication (Figure N° 60).



Figure N° 60. Différents types d'avatars transmettant différentes émotions [187]

Bien et al. [16] ont utilisé des avatars en forme de mains humaines pour permettre la communication en EV, entre des personnes sourdes et des personnes sans problèmes auditifs. Les personnes sourdes portent des gants de données pour générer du texte et du son, par l'intermédiaire d'un système de reconnaissance de geste, et le texte écrit par les personnes sans problèmes auditifs, est interprété visuellement par des avatars en forme de mains. Dans son

expérimentation "Tankathon", Jää-Aro [92] a considéré les avatars en forme de main comme étant des curseurs 3D, au même titre que les avatars en forme de flèche ou d'outil. Cette expérimentation consiste à maintenir en équilibre un système de sept réservoirs communiquant, en évitant qu'un réservoir ne se vide ou ne déborde. Pour cela, il a utilisé des avatars de formes et d'orientations différentes, tels qu'une flèche, une clé anglaise ou une main.



Figure N° 61. Curseurs 3D de formes et d'orientations différentes

On constate une utilisation importante des avatars dans les études portant sur les techniques d'interaction. La majorité des techniques d'interaction qui utilisent des avatars, sont des techniques de contrôle d'application ou de sélection et de manipulation d'objets virtuels. Komerska et Ware [107] ont développé un menu circulaire, avec une assistance haptique, afin d'améliorer la sélection et l'activation des options du menu. La position de la main de l'utilisateur est représentée par un avatar en forme de stylo. Dans une autre étude décrivant le menu TULIP [30], deux avatars en forme de mains ont été utilisés afin d'activer les options du menu. Ces options sont affichées au bout des doigts des mains virtuelles et la sélection se fait par pression entre le doigt considéré et le pouce. Dans un EV, lorsqu'un objet est à porté de main, une interaction "naturelle" telle que la technique de la "main virtuelle" [159] peut être utilisée pour sélectionner et manipuler l'objet. Lorsque l'objet virtuel n'est pas à porté de main, il faut utiliser d'autres techniques d'interaction telle que la "Go-Go" [151], le "Ray-Casting" [128], "HOMER" [25], "PRISM" [75] ou la "Bubble" [62]. Toutes ces techniques de manipulation d'objet utilisent un avatar, généralement en forme de main, mis à part la "Bubble" qui utilise un avatar en forme Sphère.

4.3.2.3 Domaines d'influence des avatars

Dans la plupart des études présentées précédemment, il n'est pas tenu compte de l'influence potentielle des avatars utilisés. Pourtant, plusieurs études ont montré que les avatars peuvent véhiculer différentes informations telles que l'identité, la localisation et les

intentions des utilisateurs [12]. Benford et al. [11] ont mené une étude qui montre l'importance des avatars dans les EV. Ils affirment que tout comme le corps humain dans la réalité, un avatar peut fournir des informations concernant l'utilisateur dont il est la représentation virtuelle. Ces informations peuvent concerner par exemple la présence, l'activité, l'attention, la disponibilité, l'humeur, la localisation, la capacité ou l'identité des utilisateurs. Ces études ont démontré que les avatars ont une forte influence dans divers domaines, tels que la présence sociale, les jeux en réseau, le e-commerce, la perception et la performance en EV.

Casanueva et Blake [38, 39] définissent la présence dans les Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC) comme une combinaison de présence virtuelle et de présence sociale. La présence virtuelle est le sentiment d'être soi-même présent dans un EV, alors que la présence sociale est le sentiment de collaborer à plusieurs dans un même EVC. Ils ont étudié l'influence des avatars sur le sentiment de présence sociale. Pour cela, ils ont réalisé une expérimentation qui a pour but d'étudier l'influence de l'apparence et des fonctionnalités (gestes et expressions faciales) d'un avatar, sur le sentiment de présence sociale. Dans cette expérimentation, les participants sont représentés par des avatars et doivent réaliser une tâche collaborative. Les avatars utilisés sont différents de par leur forme, leur niveau de réalisme et leurs fonctionnalités (Figure N° 62).

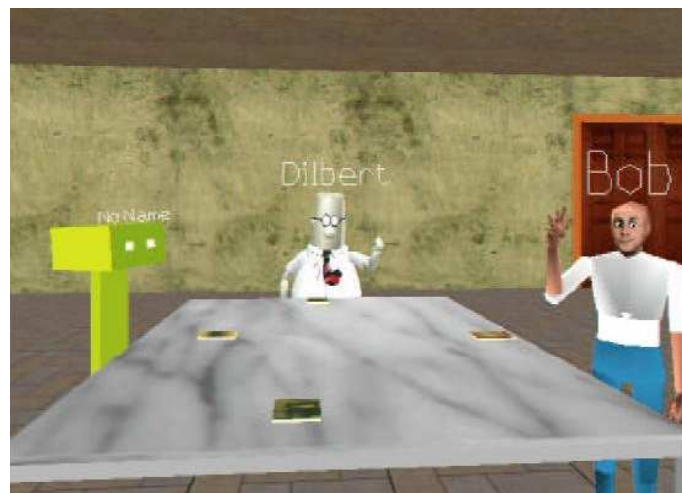


Figure N° 62. Avatars dans un EVC [38]

Il a été observé que les informations véhiculées par les avatars, telles que la position, l'identité ou les intentions des autres participants sont très importantes pour créer le sentiment de présence sociale. De plus, ils ont constaté que plus les avatars utilisés sont réalistes et ont

de fonctionnalités, plus le sentiment de présence sociale augmente. Enfin, ils ont observé que la présence sociale est plus influencée par les fonctionnalités d'un avatar que par son niveau de réalisme. Pour Benford et al. [11], un des principaux intérêts de l'utilisation des avatars dans un EVC est de savoir en un coup d'œil, si on est seul ou pas et d'identifier les personnes présentes via leur avatar. Mortensen et al. [129] ont étudié les informations transmises par les avatars et ont observé que même des avatars très peu réalistes peuvent véhiculer des informations importantes. Dans leur étude, ils ont demandé aux participants de réaliser une tâche collaborative. Deux participants géographiquement distants, ont collaboré dans un EVC, afin de transporter une civière à travers un labyrinthe (Figure N° 63). Bien qu'ils aient été représentés par des avatars très peu réalistes, les participants ont réussi à transporter la civière et à négocier des passages très difficiles du labyrinthe. De plus, ils sont parvenus à percevoir l'humeur de leur binôme.

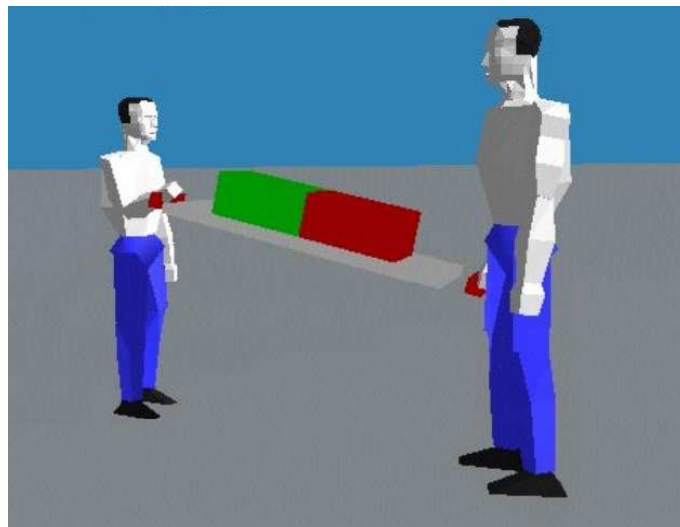


Figure N° 63. Avatars transportant une civière

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation des avatars dans le domaine des jeux en réseau. D'après Ducheneaut et Moore [65], les concepteurs de jeux en réseau encouragent les joueurs à créer plusieurs avatars. Ces différentes identités permettent de faire face aux différentes situations susceptibles d'être rencontrées tout au long du jeu, d'avoir plusieurs angles de vue et de se distinguer des autres joueurs. Il a aussi été observé que l'apparence des avatars peut influencer sur la perception que les autres joueurs ont de la personnalité du propriétaire de l'avatar. Yee [206] a étudié le comportement de 30000 utilisateurs de jeux en réseaux. Ces utilisateurs interagissent entre eux grâce aux avatars qui les représentent dans le monde virtuel. Les participants communiquent entre eux par le biais de texte, ainsi que par les

gestes et expressions de leur avatar. Ils ont une entière maîtrise de l'apparence de leur avatar. Ils peuvent par exemple choisir le sexe, l'espèce (humain ou non), la couleur de peau, l'âge, la taille, le poids et la musculature de leur avatar. Ils peuvent aussi choisir la couleur et la forme de ses yeux, son nez, ses cheveux et sa bouche. Il a été observé que les joueurs sont liés émotionnellement à leur avatar. Ils attachent beaucoup d'importance à l'apparence de leur avatar, car ce dernier détermine en grande partie la manière dont ils sont perçus par les autres participants. Prendinger et al. [154] ont mené une étude qui a pour but d'évaluer l'influence d'un avatar sur l'état émotionnel des utilisateurs d'un jeu de réflexion. Dans ce jeu, l'avatar a un rôle de présentateur et possède une gestuelle et une expressivité faciale évoluée. De ce fait, il peut véhiculer de nombreuses informations émotionnelles. Les résultats ont montré qu'un comportement emphatique de l'avatar a pour effet de réduire le stress des participants. De plus, il a été observé que les participants perçoivent le jeu comme moins difficile lorsque l'avatar a un comportement amical à leur égard. Prada et al. [153] ont étudié l'influence des avatars dans le jeu "FantasyA". Cette étude a été réalisée avec la participation de 30 utilisateurs, d'âges différents. Dans ce jeu, deux avatars se font face dans un duel d'apprentis magiciens (Figure N° 64), où les émotions dégagées et ressenties sont cruciales. Les avatars jettent tour à tour des sortilèges pour affaiblir l'adversaire ou se soigner. Par leurs gestes, les avatars peuvent exprimer plusieurs émotions telles que la colère, la peur, l'étonnement, la convoitise, la tristesse ou la joie. Les participants décident de la stratégie à adopter en fonction des émotions dégagées par l'avatar adverse. Les résultats de cette étude ont montré que les participants sont très réceptifs aux émotions dégagées par les avatars et que cette réceptivité est encore plus forte pour les jeunes participants.



Figure N° 64. Duel entre deux avatars dans le jeux FantasyA

D'après Johansen [95], dans le e-commerce aussi, les avatars ont un rôle important. Son étude porte sur l'apport des avatars pour les entreprises de ce domaine. Il a été observé que des entreprises utilisent les avatars pour guider et aider les acheteurs. En outre, il a été constaté que les avatars permettent de créer un sentiment de confiance et de satisfaction. Puisque l'attractivité et la crédibilité sont les facteurs les plus importants en communication [138], Johansen a donc étudié l'influence des avatars sur ces deux facteurs. Pour cela, elle a mené une expérimentation où chaque participant doit réaliser trois tâches. Dans un premier temps, il répond à un questionnaire portant sur son utilisation d'Internet. Dans un deuxième temps, il utilise le site Internet d'une entreprise fictive qui commercialise des chaussures. Le participant est guidé à travers le site par un avatar qui a un rôle de vendeur virtuel. Cet avatar aide le participant à concevoir une paire de chaussure à son goût. Chaque participant n'utilise qu'un seul avatar, qui est soit un avatar attractif de sexe féminin ou masculin, soit un avatar crédible de sexe féminin ou masculin. Enfin, dans la troisième partie, le participant doit remplir un questionnaire portant sur ses sentiments par rapport au site Internet et à l'avatar utilisé. La principale observation a été que les avatars crédibles sont ressentis comme beaucoup plus rassurants que les avatars attractifs. Une autre étude a évalué l'impact de l'utilisation d'EV et d'avatars sur le comportement des acheteurs en ligne [114]. Généralement, les sites de commerce en ligne se composent d'images et de texte. Lee et Chung ont émis l'hypothèse que l'ajout d'environnements virtuels et d'avatars favorise l'immersion des clients et influe sur leur intention d'achat. Les résultats ont montré que l'utilisation d'avatars dans les sites de commerce en ligne apporte plus de satisfaction aux clients et amplifie les intentions d'achat. De plus les acheteurs en ligne perçoivent les produits comme étant de meilleure qualité.

La perception que l'on a d'une personne est composée de l'ensemble des informations la concernant. La plupart du temps, notre perception n'est que visuelle. En effet, lorsque l'on croise une personne dans la rue, les seules informations que l'on a sur cette personne nous sont transmises par son aspect physique. Bien que notre perception ne se limite pas à l'aspect physique de l'autre, elle est fortement liée aux informations transmises par le corps humain [60]. Ambady et al. [5] affirment que l'être humain est capable de se faire un jugement sur une personne, en ne l'ayant aperçu que quelques instants. Dans certaines situations de collaboration à distance, les collaborateurs ne se voient pas et n'ont par conséquent pas d'informations sur l'apparence physique de l'autre. C'est pourquoi, plusieurs études ont été

menées sur l'utilisation des avatars en EV et leurs influences sur la perception. Koda [106] a montré dans son étude qu'un avatar avec un visage réaliste est bien plus apprécié qu'un avatar ayant un visage non réaliste. Dans les études menées par Taylor [187] et Persson [145], il a été montré que les avatars sont utilisés pour transmettre des émotions et ainsi influencer sur la perception des autres participants. Puisque les avatars sont utilisés dans les EV pour représenter les utilisateurs, il est sous-entendu que les caractéristiques corporelles de l'avatar correspondent à ceux de l'utilisateur qu'il représente. Cependant, contrairement à une rencontre en face à face, dans les EV l'aspect des avatars peut être changé afin de modifier la perception des autres participants [18]. Dans l'étude menée par Nowak et Rauh [136], des participants ont évalué une série d'avatars statiques (Figure N° 65), afin d'étudier leur niveau d'androgynie, d'anthropomorphisme, de crédibilité et d'attraction. Les résultats ont montré que le sexe et le niveau d'anthropomorphisme des avatars influent fortement sur la perception des participants. Les avatars anthropomorphiques ont été perçus comme plus attractifs et plus crédibles que les autres. De plus, la plupart des participants ont préféré être représentés par des avatars de leur sexe.

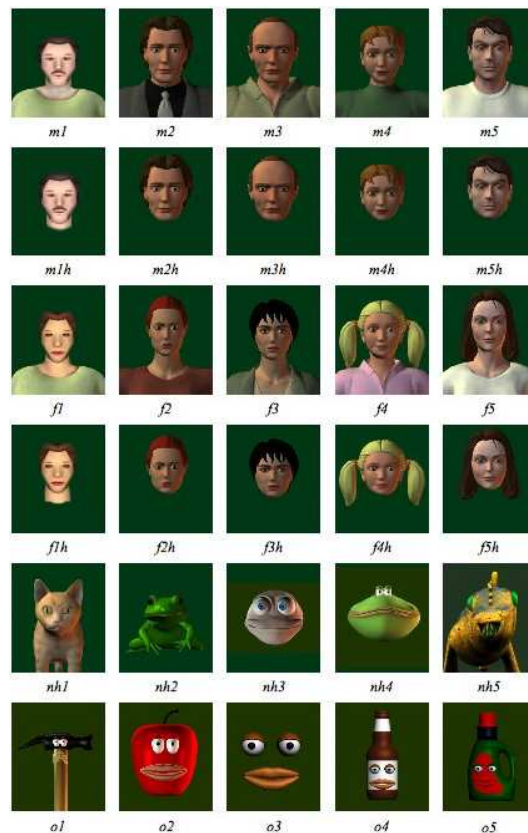


Figure N° 65. Avatars statiques [136]

Slater et al. [181] ont mené une autre étude, dans laquelle les participants ont dû faire un discours devant une assemblée composée d'avatars (Figure N° 66). Ces avatars peuvent par leurs gestes et expressions faciales, exprimer de l'intérêt ou du désintérêt. Les résultats de cette étude ont montré que les participants ont perçu clairement le niveau d'intérêt que les avatars ont porté à leur discours. En outre, il a été observé que plus les avatars ont exprimé d'intérêt au discours, plus le niveau d'anxiété des participants a diminué et inversement.

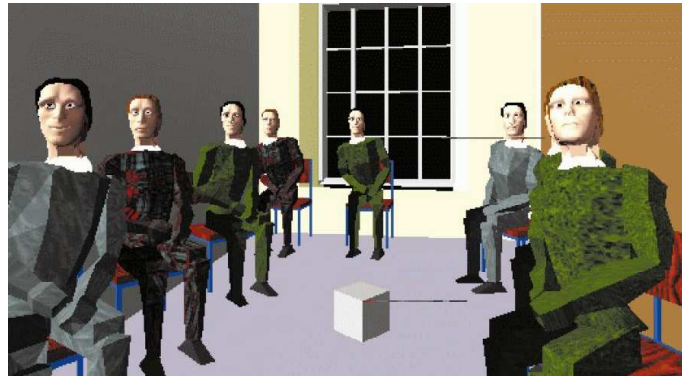


Figure N° 66. Assemblée d'avatars

Nous avons vu précédemment que la définition du terme avatar englobe les curseurs 3D en EV, mais l'utilisation des curseurs est antérieure à l'apparition des EV. La plupart des interfaces graphiques 2D utilisent les curseurs pour représenter la position des périphériques d'entrées telle que la souris. Le curseur le plus utilisé dans les interfaces graphiques 2D est en forme de flèche orientée vers le coin haut-gauche de l'écran. Phillips et al. [146] ont évalué l'impact de l'orientation des curseurs 2D et ont constaté que l'orientation des curseurs peut induire des différences de performance. Po et al. [149] ont poussé plus loin l'étude de Phillips et al., afin d'évaluer l'influence de l'orientation de différents curseurs 2D, sur la performance des utilisateurs dans la réalisation d'une tâche de sélection. Quatre curseurs en forme de flèche, avec des orientations différentes (orientée vers le coin haut-gauche, haut-droit, bas-gauche et bas droit), et un curseur sans orientation en forme de cercle ont été utilisés. A l'écran, neuf cercles ont été disposés, dont un au centre de l'écran et huit autres autour de ce cercle central (Figure N° 67). Les participants ont utilisé les différents curseurs pour se déplacer depuis le cercle central jusqu'à un cercle indiqué et sélectionner ce dernier. Les participants ont été informés qu'ils seraient évalués sur la vitesse et la précision de leurs sélections. Les résultats ont montré que le curseur orienté vers le coin bas-droit donne les plus mauvaises performances, alors que le curseur en forme de cercle donne les meilleures

performances. Po et al. en ont déduit qu'il est préférable d'utiliser un curseur possédant une orientation, lorsque cette orientation correspond à la direction des mouvements à effectuer. Alors qu'il est préférable d'utiliser un curseur sans orientation, lorsque l'utilisateur doit effectuer des mouvements dans différentes directions.

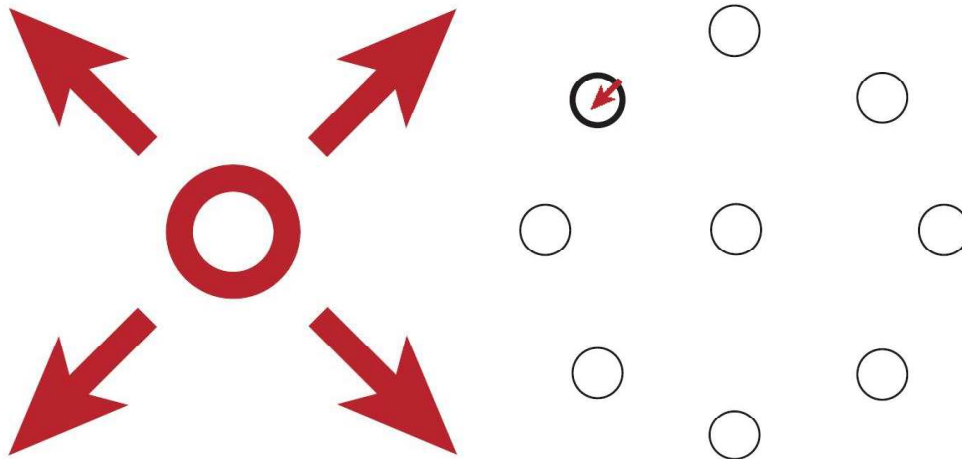


Figure N° 67. Curseurs 2D [149]

4.3.2.4 Synthèse

Nous avons vu dans les chapitres précédents que les avatars peuvent avoir des apparences très variées. De plus, plusieurs études démontrent que les avatars ont une forte influence dans divers domaines, tels que la présence sociale, les jeux en réseau, la perception, le e-commerce et la performance en EV. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'études concernant l'influence des avatars sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel, lors de tâches de sélection et de manipulation d'objets virtuels. En conséquence, préalablement à notre expérimentation concernant les prototypes, nous devons mener une étude afin de nous assurer que les utilisateurs pourront évaluer le prototype virtuel sans être influencé par leur avatar.

4.3.3 Introduction

De nombreuses interfaces de réalité virtuelle et techniques d'interactions ont été conçues durant la dernière décennie pour optimiser la sélection et la manipulation d'objets en environnement virtuel [29]. Une des plus célèbres techniques d'interactions est "la main virtuelle" développée par Robinett et Holloway [160], qui fait l'analogie avec notre manière naturelle de saisir un objet dans la réalité. Un avatar en forme de main est utilisé pour

reproduire les mouvements de la main réelle de l'utilisateur et ainsi sélectionner et manipuler directement les objets de l'EV.

Aujourd'hui, dans un EV, l'avatar représentant l'utilisateur durant une tâche de manipulation peut revêtir des formes très différentes. En effet, l'avatar d'un utilisateur peut être en forme d'outil (tournevis, marteau), en forme de corps humain ou parties de corps humains (œil, main, tête, doigt) ou en forme d'un tout autre objet avec ou sans contenu sémantique (flèche, étoile, sphère). Cependant, nous ne connaissons pas l'influence potentielle de l'apparence visuelle des avatars sur le comportement des utilisateurs, durant une tâche de manipulation en EV. C'est pourquoi, nous concentrons nos recherches sur les deux questions suivantes :

L'apparence visuelle de l'avatar utilisé pour représenter l'utilisateur dans un environnement virtuel a-t-elle une influence sur son comportement lorsqu'il saisit un objet virtuel ?

L'apparence visuelle de l'avatar utilisé pour représenter l'utilisateur dans un environnement virtuel a-t-elle une influence sur sa manière de manipuler l'interface réelle d'interaction ?

Pour étudier ces deux questions, nous avons mené trois expériences. Nous concentrons nos recherches sur l'influence d'une propriété basique de l'apparence visuelle de l'avatar d'un utilisateur. Nous étudions l'influence de la présence ou de l'absence d'indication de direction, sur la manipulation d'un objet virtuel et d'une interface réelle d'interaction. Pour cela, il est demandé aux participants de réaliser une tâche de sélection/manipulation, durant laquelle ils doivent saisir un cube virtuel et le déplacer jusqu'à un endroit indiqué de l'EV, choisi aléatoirement.

Dans la première expérience, les participants utilisent trois avatars de formes différentes et contenant des indications de directions différentes. Nous analysons ainsi l'influence de cette indication de direction sur la manière dont les participants saisissent le cube. Nous étudions plus spécifiquement comment l'information de direction d'un avatar peut changer l'emplacement de saisie du cube (la face par laquelle le cube est saisi).

La seconde expérience est menée pour confirmer les résultats de la première expérience, avec un plus grand nombre et une plus grande variété d'avatars.

Dans la troisième expérience, nous étudions l'influence de l'indication de direction des avatars sur la manière dont les participants manipulent physiquement l'interface réelle d'interaction. Pour cela nous utilisons des avatars contenant des indications de direction différentes et nous analysons leur influence sur l'orientation de la main réelle des utilisateurs, lorsqu'ils manipulent l'interface d'interaction.

4.3.4 Expériences

Nous avons mené trois expériences afin d'étudier l'influence de l'apparence visuelle des avatars sur le comportement des utilisateurs, lorsqu'ils saisissent un objet virtuel et manipulent une interface réelle d'interaction. Les trois expériences concernent une propriété basique de l'apparence visuelle des avatars : La présence ou l'absence d'indication visuelle de direction.

4.3.4.1 Expérience 1 : Influence de l'indication visuelle de direction des avatars sur la sélection d'un objet virtuel

La première expérience est menée pour étudier l'influence potentielle de l'indication de direction d'un avatar sur la stratégie de sélection d'un objet virtuel. Pour cela, il est demandé à trois groupes de participants de saisir un cube virtuel et de le positionner sur un échiquier dans l'EV. Les participants peuvent saisir le cube par la face qu'ils souhaitent. Chaque groupe utilise un seul avatar qui contient une indication de direction spécifique. A l'insu des participants, nous enregistrons la face par laquelle chaque participant saisit le cube. Ainsi, nous pouvons étudier si l'indication de direction des avatars a une influence sur la face choisie par les participants pour saisir le cube virtuel.

4.3.4.1.1 Participants

Vingt quatre participants âgés de 19 à 25 ans (moyenne=20.5; Écart Type=1.4) ont pris part à cette expérience. Il y a 2 femmes et 22 hommes. Tous les participants sont droitiers et n'ont aucune connaissance des objectifs de cette expérience.

4.3.4.1.2 Dispositifs Expérimentaux

Nous utilisons une interface haptique (PHANToM Omni de Sensable Technologies) [172] en mode passif (sans retour d'effort) pour traquer avec précision la position de la main de l'utilisateur. Les participants peuvent manipuler l'extrémité de l'interface d'interaction comme un stylo, en utilisant leur main dominante (Figure N° 68).



Figure N° 68. Dispositifs expérimentaux

La scène virtuelle (Figure N° 69) est composée d'un échiquier au sol, d'un cube rose, d'une plate-forme verte et d'un avatar bleu. Le rendu visuel est réalisé sur un écran d'ordinateur monoscopique de 19", avec une fréquence de rafraîchissement de 85Hz (Figure N° 68). Les participants peuvent donc faire bouger l'avatar virtuel en manipulant l'interface PHANToM. Cependant, l'orientation de l'avatar reste constante, les rotations de l'interface et de la main de l'utilisateur ne sont pas appliquées à l'avatar.

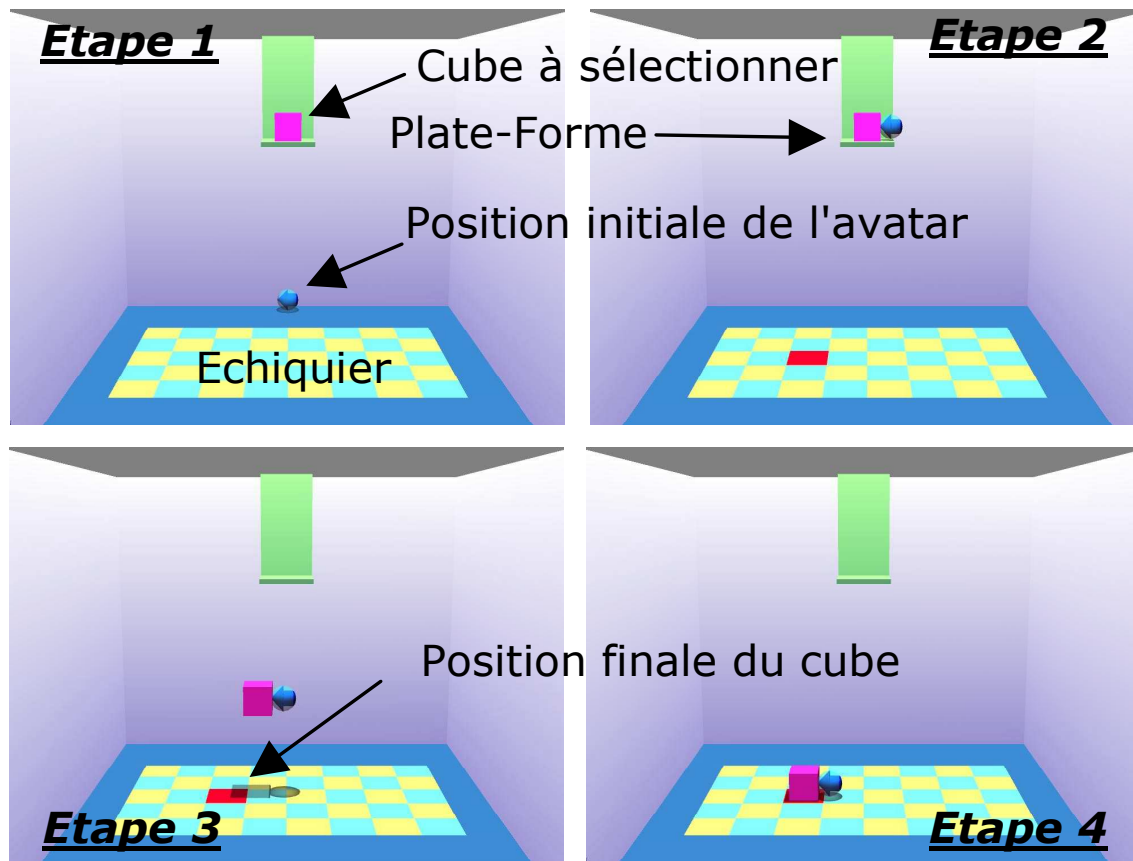


Figure N° 69. Scène virtuelle et procédure de la tâche à accomplir

4.3.4.1.3 Procédure

Les participants sont assis face à l'écran et le PHANToM est placé devant eux (Figure N° 68). Les participants utilisent leur main non dominante pour le clavier. Chaque essai est composé de deux phases, une phase de sélection du cube et une phase de déplacement du cube. Au début de chaque essai, le cube virtuel est automatiquement repositionné sur la plate-forme virtuelle en haut de l'écran (Figure N° 69).

- **Sélection** : Les participants doivent d'abord appuyer sur une touche du clavier pour commencer l'essai. Ensuite, l'avatar apparaît automatiquement à sa position initiale, en bas de l'écran (Figure N° 69). Les participants prennent alors l'extrémité du PHANToM et la retirent de sa position initiale. Ils saisissent ensuite le cube virtuel qui est positionné sur la plate-forme. Pour cela, ils doivent mettre la sphère englobant l'avatar (Figure N° 70) en contact avec le cube et presser la barre espace du clavier.
- **Déplacement** : Une fois que le cube est sélectionné, la position finale où doit être reposé le cube est choisie aléatoirement et indiquée aux participants par un

changement de couleur sur l'échiquier (Figure N° 69). Les participants déplacent alors le cube virtuel jusqu'à sa position finale. Les mouvements des participants sont directement appliqués à l'avatar et au cube (mise à part les rotations), par l'intermédiaire de l'interface PHANToM. Pour relâcher le cube, les participants doivent relâcher la barre espace. Lorsque les participants estiment que le cube est bien positionné, ils terminent l'essai en pressant une touche du clavier. L'avatar disparaît et les participants remettent le PHANToM en position initiale, dans son socle. L'essai suivant peut alors être commencé.

4.3.4.1.4 Conditions

Nous utilisons trois avatars différents dans cette expérience, un avatar en forme "d'étoile" et deux avatars en forme de "flèche" (Figure N° 70). Contrairement à l'étoile, les deux flèches contiennent une indication de direction. Ces trois avatars sont visuellement différents, mais ils ont exactement la même surface de contact avec le cube. En effet, ils sont contenus dans la même sphère semi-transparente, qui assure le même type de contact avec le cube.



Figure N° 70. Avatars utilisés pour l'Expérience 1

Les 24 participants sont divisés en 3 groupes de 8 personnes. Les participants de chaque groupe n'utilisent qu'un seul avatar, les participants du premier groupe par exemple n'utilisent que l'avatar en forme d'étoile durant toute l'expérience. Chaque participant réalise 55 essais. Au début de chaque expérience, il y a une phase d'apprentissage constituée de 5 essais. Cette phase d'apprentissage permet aux participants de se familiariser avec le PHANToM, ainsi qu'avec la tâche à accomplir. L'expérience dure environ 40 minutes au total, incluant la phase d'apprentissage et les pauses que les participants peuvent prendre après chaque essai.

4.3.4.1.5 Données collectées

Pour chaque essai, nous collectons la face par laquelle les participants saisissent le cube : avant, arrière, bas, haut, gauche, droite (Figure N° 71).

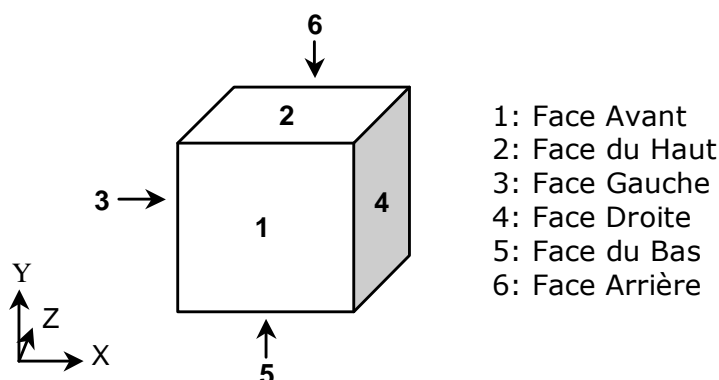


Figure N° 71. Faces du cube virtuel

4.3.4.1.6 Résultats

Les pourcentages moyens de sélection pour chaque face du cube virtuel en fonction des trois avatars, sont donnés dans le Tableau N° 9. Globalement, les participants privilégient la face avant du cube (45% des essais de tous les participants, quelles que soit les conditions expérimentales). Dans l'ordre de préférence, les participants choisissent ensuite la face de droite (25%), la face du haut (15%), la face de gauche (11%) et la face arrière (4%). La face du bas est difficilement accessible, car le cube est posé sur la plate-forme, lors de sa sélection. Cette condition n'est donc pas reportée dans le Tableau N° 9.

Statistiquement, les résultats de cette première expérimentation révèlent une forte corrélation entre les avatars et la face choisie pour saisir le cube (Cramer's $V^2=0.45$). Pour une analyse plus poussée de cette corrélation, nous calculons la Déviation Relative¹ (DR) associée. Les résultats présentés dans le Tableau N° 9 montrent que pour l'avatar en forme d'étoile, les participants favorisent la face avant du cube. L'avatar en forme de flèche pointant vers la gauche est fortement corrélé avec la face droite du cube. Enfin, l'avatar en forme de flèche pointant vers la droite est fortement corrélé avec la face gauche et la face avant du cube. De plus, le test est très significatif ($\text{Khi } 2 = 1056.9$, $\text{DoF} = 10$, $p < 0.0001$), ce qui confirme la forte influence des avatars sur les participants et leur stratégie de saisie du cube.

¹ La Déviation Relative (DR) mesure la corrélation entre deux variables nominales. Elles ont été calculées en comparant les fréquences observées et prévues (celle que l'on aurait obtenue, s'il n'y avait pas de corrélation entre les deux variables). Il y a "attraction" lorsque la DR est positive et il y a "répulsion" lorsque la DR est négative. Par convention, nous reportons seulement les DR positives >0.20 .

Avatar	Face Avant	Face du Haut	Face Gauche	Face droite	Face Arrière
Etoile	<u>67,05%</u>	27,50%	0,23%	0,45%	4,77%
Flèche pointant vers la gauche	26,59%	0,91%	0,45%	<u>70,68%</u>	1,36%
Flèche pointant vers la droite	<u>41,59%</u>	16,59%	<u>32,73%</u>	2,95%	6,14%

Tableau N° 9. Expérience 1 : Choix des participants concernant la face de saisie du cube virtuel, en fonction des trois avatars (Les valeurs indiquées en gras et soulignées correspondent à une DR positive >0.20)

4.3.4.1.7 Analyse des résultats

Nous constatons que la face avant du cube est globalement privilégiée pour saisir le cube. Ceci est probablement dû au fait que la face avant est la plus visible et la plus facile d'accès. L'avatar en forme d'étoile, qui ne contient pas d'indication de direction, est très corrélé avec la face avant du cube. Ensuite, les participants préfèrent saisir le cube par la face droite, lorsqu'ils utilisent l'avatar en forme de flèche pointant vers la gauche. Inversement, ils préfèrent saisir le cube par la face gauche, lorsqu'ils utilisent l'avatar en forme de flèche pointant vers la droite.

Tous ces résultats suggèrent que, d'une part, si l'avatar utilisé contient une indication de direction, l'utilisateur a tendance à saisir l'objet virtuel, en tenant compte de cette indication de direction. L'utilisateur "pointe" l'objet et place l'axe principal de l'avatar perpendiculairement à la surface de l'objet. D'autre part, lorsque l'avatar ne contient pas d'indication de direction, l'utilisateur a tendance à saisir l'objet virtuel par l'avant.

Nous avons observé que la face avant du cube est largement choisie lorsque les participants utilisent l'avatar en forme de flèche pointant vers la droite. Cela peut être expliqué par le fait de tous les participants sont droitiers et manipulent l'interface d'interaction de leur main droite. Ainsi, il est plus difficile pour eux de tourner leur poignet pour pointer vers la droite et il est moins "naturel" pour eux d'atteindre et de saisir le cube par sa face gauche.

4.3.4.1.8 Conclusion

Cette première expérience suggère une forte influence de l'apparence visuelle des avatars, sur la stratégie des participants lors de la sélection d'un objet virtuel. L'indication visuelle de direction des avatars semble donc influencer la manière dont les participants

saisissent le cube virtuel. En effet, les participants saisissent le cube virtuel par des faces différentes lorsque l'indication de direction de l'avatar est changée.

4.3.4.2 Expérience 2 : Répétition de l'Expérience 1 avec plus d'avatars, parmi lesquels des avatars anthropomorphiques

L'objectif de cette seconde expérience est de vérifier les résultats obtenus dans l'Expérience 1, en utilisant un plus grand nombre et une plus grande variété d'avatars. Les participants doivent réaliser la même tâche de saisie et de déplacement d'objet que dans l'Expérience 1. Nous étudions aussi l'influence de l'anthropomorphisme d'un avatar en forme de "main virtuelle". Pour cela, nous ajoutons deux avatars en forme de main, suggérant ainsi une analogie avec la main de l'utilisateur.

4.3.4.2.1 Participants

Douze nouveaux participants âgés de 21 à 39 ans (moyenne=24.9; Écart Type=6.1) ont pris part à cette expérience. Il y a 8 femmes et 4 hommes. Tous les participants sont droitiers et n'ont aucune connaissance des objectifs de cette expérience.

4.3.4.2.2 Dispositifs Expérimentaux

Nous utilisons la même interface d'interaction et le même matériel de rendu visuel que dans l'Expérience 1. Cependant, pour cette expérience, nous retirons le stylet du PHANTOM afin que les participants puissent insérer directement la dernière phalange de leur index dans l'extrémité de l'interface d'interaction.

4.3.4.2.3 Procédure

La procédure ainsi que la tâche à réaliser sont exactement les mêmes que dans l'Expérience 1 (Figure N° 69). Toutefois, dans cette expérience, chaque participant utilise l'ensemble des avatars.

4.3.4.2.4 Conditions

Dans cette expérience, nous utilisons six avatars différents (Figure N° 72). Ces six avatars comprennent deux flèches (les mêmes que dans l'Expérience 1), deux étoiles (la première est la même que dans l'Expérience 1) et deux mains virtuelles. Les avatars en forme de mains et de flèches contiennent une indication de direction, ils pointent vers la gauche ou

la droite. Comme dans la première expérience, une sphère englobante et semi-transparente est utilisée pour assurer la même surface de contact avec le cube virtuel (Figure N° 72).

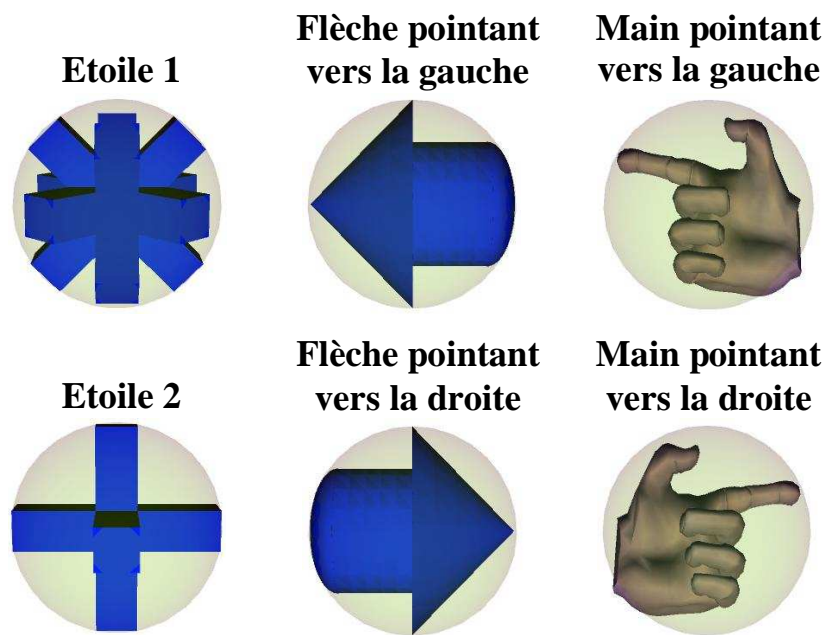


Figure N° 72. Avatars utilisés dans l'Expérience 2

Chaque participant réalise 66 essais, répartis en 11 séries de 6 essais. Dans une même série, le participant utilise les six avatars, qui apparaissent dans un ordre aléatoire. Au début de chaque expérience, il y a une phase d'apprentissage constituée de 6 essais (les 6 avatars différents, dans un ordre aléatoire). Cette phase d'apprentissage permet aux participants de se familiariser avec le PHANToM, ainsi qu'avec la tâche à accomplir. L'expérience dure environ 40 minutes au total, incluant la phase d'apprentissage et les pauses que les participants peuvent prendre après chaque essai.

4.3.4.2.5 Données collectées

Comme dans l'Expérience 1, pour chaque essai, nous enregistrons la face par laquelle les participants saisissent le cube.

4.3.4.2.6 Résultats

Les pourcentages moyens de sélection pour chaque face du cube virtuel en fonction des six avatars, sont donnés dans le Tableau N° 10. Globalement, les participants privilégient encore une fois la face avant du cube (34% des essais de tous les participants). Dans l'ordre de

préférence, les participants choisissent ensuite la face de droite (29%), la face du haut (17%), la face de gauche (16%) et la face arrière (3%).

Les résultats de cette expérience révèlent une corrélation entre les avatars et la stratégie de sélection du cube virtuel (Cramer's $V^2=0.11$). Une analyse de la déviation relative montre que lorsque les participants utilisent les deux avatars en forme d'étoile (Etoile 1 et Etoile 2), ils privilégient fortement la face avant et la face du haut pour saisir le cube. Mais la face avant est la plus corrélée avec les avatars en forme d'étoile. Pour les autres avatars, nous constatons de nouveau une influence significative de l'indication de direction (droite/gauche), sur le choix de la face de saisie du cube. Les deux avatars en forme de flèche et de main pointant vers la gauche sont corrélés avec la face droite du cube. Inversement, les deux avatars en forme de flèche et de main pointant vers la droite sont corrélés avec la face gauche et la face avant du cube. De plus, le test est très significatif ($\text{Khi}^2=373.975$, $\text{DoF}=20$, $p<0.0001$), ce qui confirme l'influence des avatars sur les participants et leur stratégie de saisie du cube.

Avatar	Face Avant	Face du Haut	Face Gauche	Face droite	Face Arrière
Etoile 1	<u>48,61%</u>	<u>21,53%</u>	3,47%	22,22%	4,17%
Etoile 2	<u>40,97%</u>	<u>22,22%</u>	5,56%	24,31%	6,94%
Flèche pointant vers la gauche	22,22%	15,28%	0,00%	<u>62,50%</u>	0,00%
Flèche pointant vers la droite	<u>33,33%</u>	15,97%	<u>46,53%</u>	0,69%	3,47%
Main pointant vers la gauche	22,92%	13,19%	0,00%	<u>63,19%</u>	0,69%
Main pointant vers la droite	<u>34,72%</u>	15,97%	<u>42,36%</u>	2,78%	4,17%

Tableau N° 10. Expérience 2 : Choix des participants concernant la face de saisie du cube virtuel, en fonction des six avatars

4.3.4.2.7 Analyse des résultats

Concernant les deux avatars en forme d'étoile, nous observons encore une fois une forte corrélation avec la face avant du cube. Lorsque les participants utilisent les avatars en forme de flèche et de main pointant vers la gauche, ils ont de nouveau tendance à saisir le cube par sa face droite. Inversement, lorsqu'ils utilisent les avatars en forme de flèche et de main pointant vers la droite, ils favorisent la face gauche et la face avant du cube. Les résultats sont en accord avec ceux de l'Expérience 1. Cependant, la face avant du cube est ici

moins privilégiée que la face gauche avec l'avatar en forme de flèche pointant vers la droite. Cela peut être dû au fait que chaque participants utilise successivement les six avatars. Le fait de changer d'avatar à chaque essai peut faire percevoir les conditions expérimentales aux participants, modifiant ainsi leur stratégie de saisie du cube virtuel.

L'influence de l'indication de direction est observée dans les même proportions, pour les avatars en forme de flèche et les avatars en forme de main. Cela suggère que l'anthropomorphisme d'un avatar en forme de main virtuelle, ne renforce pas l'influence de l'indication de direction. Ce résultat semble infirmer l'hypothèse d'un potentiel transfert entre la main virtuelle et la main réelle de l'utilisateur. Cependant, le pourcentage de saisie du cube par sa face de gauche est légèrement supérieur (+10%) avec la flèche pointant vers la droite qu'avec la main pointant vers la droite. Cela peut être dû au fait que tous les participants sont droitiers et sont par conséquent moins influencés par un avatar en forme de main gauche.

4.3.4.2.8 Conclusion

Les résultats de cette seconde expérience semblent confirmer l'influence de l'aspect visuel des avatars sur la stratégie adoptée par les participants, pour choisir la face de saisie du cube virtuel. Les avatars sans indication de direction conduisent les participants à saisir le cube par ses faces avant ou du haut. L'indication de direction des avatars en forme de flèches et de mains incitent les participants à saisir le cube virtuel par ses faces de droite ou de gauche. Enfin, il ne semble pas y avoir d'effet spécifique aux avatars anthropomorphiques.

4.3.4.3 Expérience 3 : Influence de l'indication visuelle de direction des avatars sur la manipulation d'une interface réelle d'interaction

Dans cette expérience, nous étudions l'influence de l'orientation d'un avatar sur la manière dont les participants manipulent physiquement l'interface réelle d'interaction. Les participants réalisent la même tâche de sélection et de déplacement d'un cube virtuel que dans les deux expériences précédentes. Nous utilisons dans cette expérience deux avatars en forme de main, ayant des orientations différentes. A l'insu des participants, nous enregistrons l'orientation angulaire de l'extrémité de l'interface d'interaction, pour déterminer si l'indication de direction des avatars a une influence sur la manière dont les participants manipulent l'interface.

4.3.4.3.1 Participants

Seize nouveaux participants âgés de 22 à 32 ans (moyenne=23.7; Écart Type=2.5) ont pris part à cette expérience. Il y a 8 femmes et 8 hommes. Tous les participants sont droitiers et n'ont aucune connaissance des objectifs de cette expérience.

4.3.4.3.2 Dispositifs Expérimentaux et Procédure

Nous utilisons les mêmes dispositifs expérimentaux et la même procédure que dans l'Expérience 2. Cependant, dans cette expérience, au début de chaque essai, il est explicitement spécifié aux participants par quelle face ils doivent saisir le cube. Pour cela, une fenêtre est affichée sur l'écran d'ordinateur, jusqu'à ce que le participant presse une touche du clavier. Cette fenêtre indique la face du cube à saisir, avec à la fois une explication textuelle et une représentation graphique (Figure N° 73). Il est demandé aux participants de saisir le cube par le centre de la face indiquée.

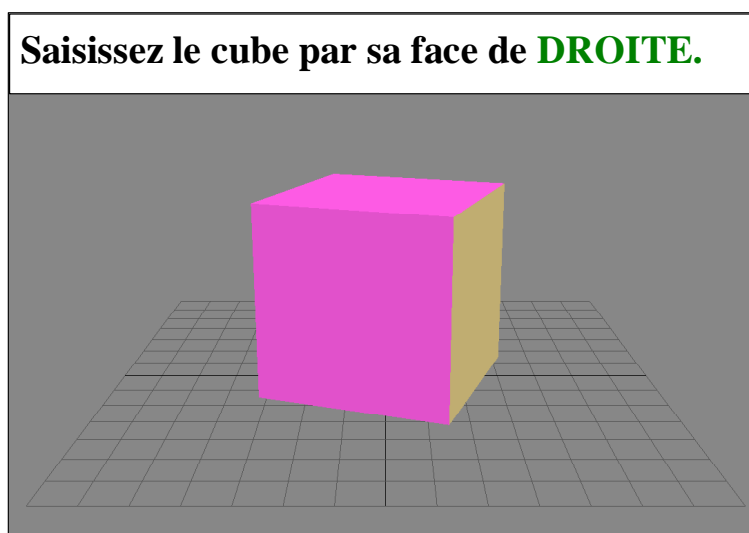


Figure N° 73. Fenêtre indiquant la face du cube à saisir (colorer en jaune)

4.3.4.3.3 Conditions

Nous utilisons deux avatars en forme de main droite (Figure N° 74), la première main virtuelle pointe vers la gauche ($rX=0^\circ$; $rY=90^\circ$; $rZ=0^\circ$) et la deuxième pointe vers l'avant ($rX=0^\circ$; $rY=15^\circ$; $rZ=0^\circ$). Ainsi, ces deux avatars ne diffèrent que par leur indication de direction, la différence d'orientation se situe au niveau de l'axe Y ($\Delta rY=75^\circ$).

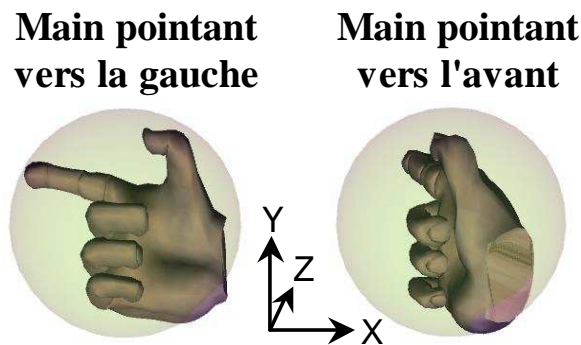


Figure N° 74. Avatars utilisés pour l'Expérience 3

Les participants sont divisés en 2 groupes de 8 personnes. Les participants de chaque groupe n'utilisent qu'un seul avatar (main pointant vers la gauche ou main pointant vers la l'avant) durant toute l'expérience.

Nous utilisons seulement trois faces pour saisir le cube, la face avant, la face du haut et la face de droite (Figure N° 71). Les trois faces du cube apparaissent successivement et de manière aléatoire dans chaque série de trois essais. Les participants réalisent 15 séries de 3 essais. Ainsi, chaque participant de chaque groupe effectue un total de 45 essais (1 avatar * 3 faces * 15 séries). Au début de chaque expérience, il y a une phase d'apprentissage constituée de 3 essais (les 3 faces différentes). Cette phase d'apprentissage permet aux participants de se familiariser avec le PHANToM, ainsi qu'avec la tâche à accomplir. L'expérience dure environ 40 minutes au total, incluant la phase d'apprentissage et les pauses que les participants peuvent prendre après chaque essai.

4.3.4.3.4 Données collectées

Deux données sont collectées à chaque essai : Le **temps** (en secondes) entre le début de l'essai et la saisie du cube, et l'**orientation** (en degrés) de l'extrémité du PHANToM sur les trois axes (X, Y et Z), lorsque le participant saisit le cube. L'orientation du PHANToM, lorsqu'il est en position initiale dans son socle, a une valeur constante ($rX=-24^\circ$; $rY=0^\circ$; $rZ=0^\circ$).

4.3.4.3.5 Résultats

Nous avons réalisé une Analyse de la Variance (ANOVA) sur le temps de saisie du cube. Globalement, les résultats montrent que les participants sont 8,6% plus rapides pour saisir le cube par la face avant ($t=7813\text{ms}$, $sd=6905\text{ms}$) que par la face droite ($t=8550\text{ms}$,

sd=7325) et 10,7% plus rapide que par la face du haut ($t=8750\text{ms}$, $sd=8105$). Nous remarquons aussi que le temps de sélection du cube est 3,5% plus court avec l'avatar en forme de main pointant vers la gauche ($t=8221\text{ ms}$, $sd=7840$), qu'avec l'avatar en forme de main pointant vers l'avant ($t=8521\text{ms}$, $sd=7071$). Cependant, le temps de sélection du cube n'est influencé significativement, ni par l'avatar ($F(1,14)=0.73$, n.s.), ni par la face de sélection du cube ($F(2,28)=1.223$, n.s.). Toutefois, nous observons une influence significative du nombre d'essai ($F(14,196)=39.101$, $p<0.0001$), qui suggère un effet d'apprentissage typique. Plus le nombre d'essai augmente, plus le temps nécessaire à la sélection du cube diminue.

Les figures suivantes présentent les orientations moyennes de l'extrémité du PHANToM, lors de la saisie du cube, pour les trois axes (X, Y, Z), en fonction des deux avatars (Figure N° 75, Figure N° 76 et Figure N° 77). La plus grande différence d'orientation angulaire ($23,75^\circ$) entre les deux avatars, lors de la manipulation du PHANToM, concerne l'axe Y (Figure N° 76).

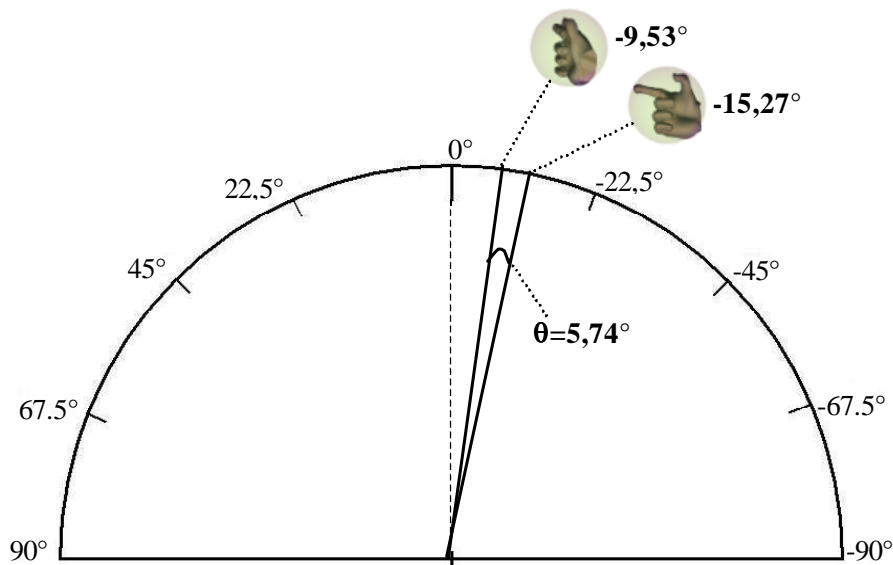


Figure N° 75. Orientation de l'extrémité du PHANToM sur l'axe X, lorsque le cube virtuel est saisi, en fonction des deux avatars

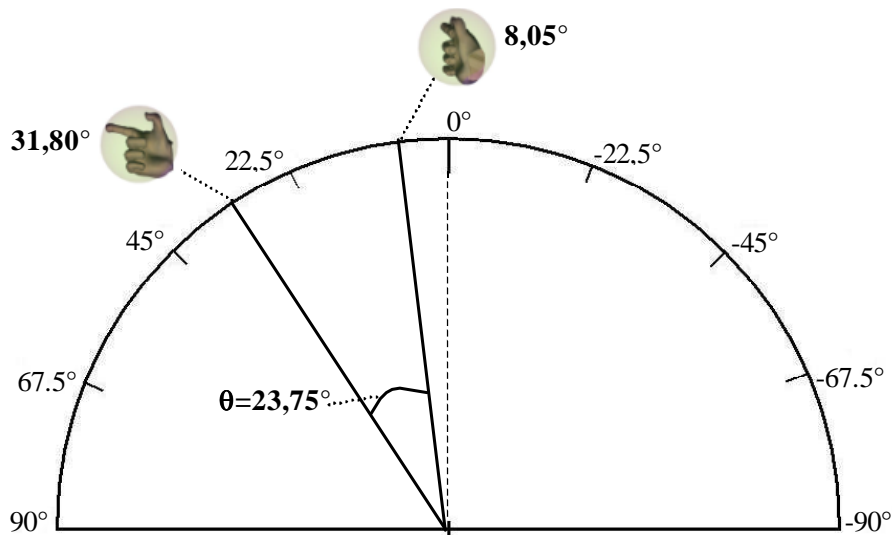


Figure N° 76. Orientation de l'extrémité du PHANToM sur l'axe Y, lorsque le cube virtuel est saisi, en fonction des deux avatars

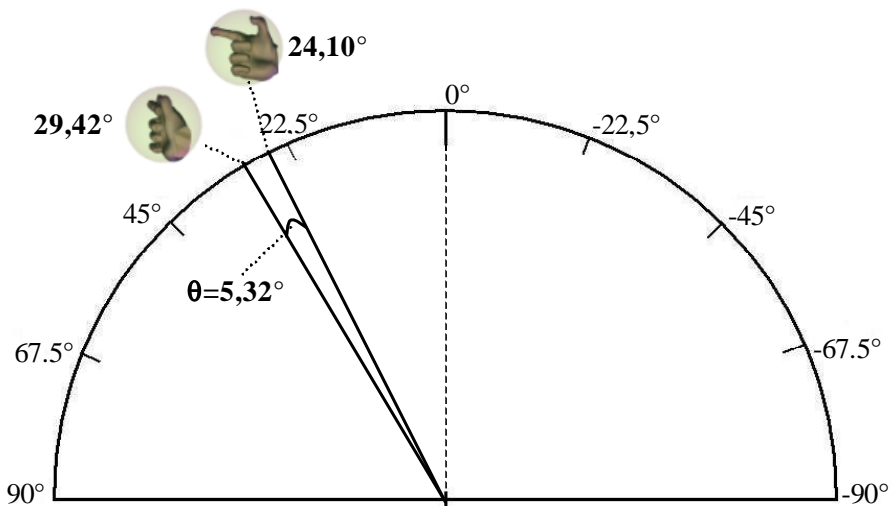


Figure N° 77. Orientation de l'extrémité du PHANToM sur l'axe Z, lorsque le cube virtuel est saisi, en fonction des deux avatars

Nous avons également réalisé une Analyse Multivariée de la Variance (MANOVA) sur l'orientation du PHANToM sur ses trois axes (X, Y et Z), au moment de la sélection du cube, en fonction des avatars. Cette analyse nous permet de constater une forte influence des avatars sur l'orientation de l'extrémité du PHANToM (Lambda Wilks=0.378; $F(3,716)=391.909$, $p<0.0001$). Cette influence se vérifie sur les trois axes, mais est encore une fois plus importante sur l'axe Y (Tableau N° 11).

Avatar	X F(1.718)= 46.146, p<0.0001	Y F(1.718)=724.817 p<0.0001	Z F(1.718)=4.074 p<0.0304
Main pointant vers la gauche	Angle=-15.27° sd=13°	Angle=31.80° sd=14°	Angle=24.10° sd=28°
Main pointant vers l'avant	Angle=-9.526 sd=9°	Angle=8.05 sd=9°	Angle=29.42° sd=37°

Tableau N° 11. Orientation de l'extrémité du PHANToM sur ses trois axes, en fonction des deux avatars

Nous avons Ensuite réalisé une ANOVA pour chaque axe du PHANToM. Nous observons un effet significatif du nombre d'essai sur l'axe X ($F(14,196)=5.759$; $p<0.0001$). Plus le nombre d'essais augmente, plus la valeur de l'angle sur l'axe X diminue en valeur absolue. Nous constatons aussi un effet important des avatars sur l'orientation sur l'axe Y ($F(1,14)= 19,401$, $p<.0006$). De plus, les résultats montrent une forte influence de la face de sélection du cube ($F(2,28)=6,902$, $p<.0037$). L'analyse ANOVA montre une forte interaction entre les avatars et les faces de saisie du cube ($F(2,28)=11,206$, $p<.0003$) (Tableau N° 12). En outre, la combinaison composée de l'avatar pointant vers la gauche et de la face droite du cube accentue fortement l'orientation angulaire du PHANToM sur l'axe Y (Tableau N° 12).

Avatar	Axe X		
	Face Avant	Face du Haut	Face Droite
Main pointant vers la gauche	-15,68°	-14,00°	-16,12°
Main pointant vers l'avant	-9,63°	-9,02°	-9,93°
	Axe Y		
	Face Avant	Face du Haut	Face Droite
Main pointant vers la gauche	28,42°	28,88°	<u>38,10°</u>
Main pointant vers l'avant	7,45°	9,20°	7,50°
	Axe Z		
	Face Avant	Face du Haut	Face Droite
Main pointant vers la gauche	24,37°	25,08°	22,85°
Main pointant vers l'avant	29,98°	31,44°	26,85°

Tableau N° 12. Angles moyens de l'extrémité du PHANToM sur ses trois axes, en fonction des avatars et des faces de saisi du cube

4.3.4.3.6 Analyse des résultats

Pour saisir le cube par les trois faces indiquées, les participants doivent probablement tourner leur poignet de manière légèrement différente afin d'atteindre chacune de ces faces. Cela peut expliquer l'effet significatif constaté, des faces de saisie du cube, sur l'orientation de l'extrémité du PHANToM.

Les deux avatars en forme de main ont la même forme graphique et contiennent tous les deux une indication de direction, mais ils ont des orientations différentes sur l'axe Y. Cette différence d'orientation induit une forte différence d'orientation de l'extrémité du PHANToM, sur l'axe Y. Cette différence peut atteindre plus de 30° lors de la saisie du cube par sa face droite (38,10° avec la main pointant vers la gauche, contre 7,50° pour la main pointant vers l'avant). Dans les expériences précédentes, la plus forte corrélation est effectivement obtenue par le couple composé de l'avatar pointant vers la gauche et de la face droite du cube.

Ainsi, il semble que les participants tournent plus leur main sur l'axe Y, lorsqu'ils utilisent l'avatar présentant le plus grand angle sur l'axe Y. Ce résultat suggère que les participants ont tendance à aligner leur main sur la main virtuelle. En d'autres termes, ils ont tendance à imiter la posture de leur avatar.

4.3.4.3.7 Conclusion

Les résultats de cette troisième expérience montrent une influence des avatars sur la manière dont les participants manipulent physiquement l'interface réelle d'interaction. Les participants changent l'orientation de l'extrémité du PHANToM, où leur doigt est inséré, en fonction de l'orientation suggérée visuellement par l'avatar.

4.3.5 Synthèse

Nos résultats révèlent qu'une propriété visuelle de l'avatar représentant l'utilisateur dans un environnement virtuel, peut influencer le comportement des participants durant une tâche de manipulation. L'indication de direction suggérée visuellement par l'avatar, modifie à la fois la manière dont les participants saisissent un objet virtuel et la manière dont ils manipulent l'interface d'interaction.

Dans les deux premières expériences, nous constatons effectivement que les participants saisissent le cube virtuel par des faces différentes, lorsque l'indication de direction

de l'avatar est changée. Si l'avatar contient une indication de direction, l'utilisateur a tendance à saisir l'objet en "pointant" le centre de cet objet. Lors de la troisième expérience, nous constatons que l'indication de direction des avatars influe sur la manière dont les participants manipulent l'interface d'interaction. Ils ont tendance à aligner l'orientation de leur main et de l'interface, sur l'orientation de l'avatar en forme de main.

Contrairement aux précédentes études de Philips et al. [146] et Po et al. [149], réalisées en environnement 2D, nous ne nous sommes pas concentrés sur la performance des utilisateurs, mais sur leur comportement. Nous avons observé que les participants adaptent naturellement leur stratégie de saisie du cube, en fonction de l'indication de direction suggérée par l'avatar utilisé. Ils ont tendance à saisir l'objet virtuel en "pointant" son centre. Ce résultat semble confirmer les résultats de l'étude de Po et al. [149], qui ont montré que la performance diminue lorsque l'indication de direction du curseur 2D utilisé est opposée au mouvement. En outre, Po et al. [149] ont montré que les chutes de performance dus à l'indication de direction des curseurs 2D, diffèrent en fonction des interfaces d'interaction utilisées. Ici, nous montrons une influence directe de l'indication de direction des avatars, sur la manipulation physique de l'interface d'interaction.

Dans le futur, nous devrions voir de plus en plus d'applications de RV sur le marché, celles-ci nécessiteront pour la plupart l'utilisation d'avatars représentant l'utilisateur. Les résultats de notre étude peuvent aider les concepteurs de ces applications de RV. En effet, d'après les résultats des deux premières expériences, il semble possible de concevoir un avatar qui induit un comportement et des stratégies spécifiques lors de la manipulation d'objets en environnement virtuel. De plus, si on ne tient pas compte de l'apparence visuelle des avatars et plus spécifiquement de leur indication de direction, cela peut générer une influence non souhaitée, lors de la manipulation de l'interface d'interaction, par les utilisateurs.

Une de ces applications est le prototypage virtuel. L'utilisation des avatars est nécessaire pour le prototypage virtuel, car, comme nous l'avons vu précédemment, le prototype virtuel est une représentation du futur produit, avec laquelle l'utilisateur doit pouvoir interagir [76]. Il peut par exemple, en utilisant des périphériques de RV tel qu'une interface haptique, manipuler le produit afin de tester son ergonomie et ses fonctionnalités. L'utilisation d'un avatar dont on ne tiendrait pas compte de l'influence, pourrait donc fausser l'évaluation du prototype virtuel. Lorsqu'on sait que les décisions prises dans les phases

amonts du processus de conception représentent de 60 à 80% de l'engagement des dépenses nécessaires à la réalisation d'un produit [190], on comprend que des décisions prises sur la base d'une évaluation faussée par un avatar inadéquat, peuvent engendrer des surcoûts très importants.

Il pourrait être intéressant de concevoir des avatars qui puissent changer automatiquement leurs propriétés visuelles en fonction du contexte de manipulation. Cela est déjà le cas dans certaines applications de bureautique utilisant des curseurs 2D, qui changent par exemple lorsqu'ils survolent un lien internet. De même, nous pourrions modifier l'indication de direction de l'avatar, en fonction de la tâche de manipulation à réaliser ou des propriétés des objets virtuels à saisir.

Une autre application de nos résultats concerne la manipulation des interfaces haptiques. Les interfaces haptiques ont généralement un espace de travail limité, ce qui peut être un inconvénient pour la manipulation d'objets virtuels. Plus particulièrement, le débattement angulaire des interfaces haptiques est parfois réduit et l'utilisateur peut rapidement atteindre les butées mécaniques de l'interface, lorsqu'il tourne un objet virtuel. Des techniques d'interaction 3D spécifiques ont été développées dans notre laboratoire pour faire face à ce problème [63]. D'après les résultats de la troisième expérience de notre étude, il semble possible de restreindre l'orientation de l'interface haptique, en utilisant l'orientation visuelle de l'avatar représentant l'utilisateur. Cependant, des travaux complémentaires sont nécessaires pour examiner cette possibilité.

4.3.6 Conclusion

Nous avons étudié l'influence de l'indication visuelle de direction de l'avatar utilisé pour représenter l'utilisateur dans un environnement virtuel, durant une tâche de sélection et de manipulation. Les résultats des deux premières expériences suggèrent que l'indication de direction d'un avatar peut changer la manière dont les participants saisissent un objet virtuel. Lorsque les participants utilisent les avatars sans indication de direction, ils ont tendance à saisir le cube par sa face avant ou sa face du haut. Lorsque les participants utilisent les avatars contenant une indication de direction (les flèches et les mains virtuelles), ils ont tendance à saisir le cube par sa face droite ou sa face gauche. Dans la troisième expérience, nous avons constaté que l'indication de direction des avatars peut aussi affecter la manière dont les

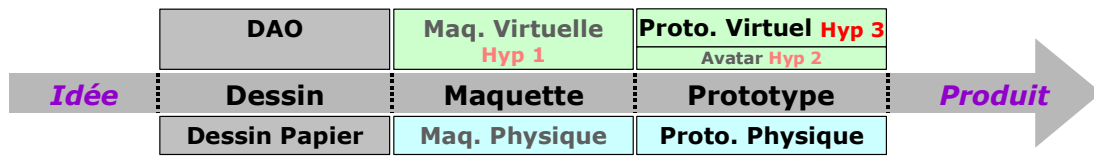
participants manipulent l'interface réelle d'interaction. Les participants modifient l'orientation de leur main, en fonction de l'orientation suggérée visuellement par la forme de l'avatar.

L'ensemble de nos résultats suggère donc que le choix de l'apparence graphique de l'avatar représentant l'utilisateur est très important pour réaliser des tâches de manipulation d'objets virtuels. En effet, l'indication visuelle de direction d'un avatar peut partiellement déterminer la stratégie de manipulation en environnement virtuel. Elle peut ainsi aider ou gêner l'utilisateur lorsqu'il manipule des objets virtuels et des interfaces réelles d'interactions. Une telle influence pourrait être utilisée pour favoriser une utilisation optimale des interfaces d'interaction, tel que les interfaces haptiques ayant un débattement angulaire limité. Une autre exploitation de cette influence pourrait être la conception d'un avatar qui change de forme et d'orientation, selon la tâche à réaliser.

Cette troisième expérimentation semble donc valider notre troisième hypothèse, d'après laquelle l'apparence visuelle des avatars nécessaires à la manipulation de prototypes virtuels, a une influence sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel, dans le cadre des choix expérimentaux qui ont été faits.

Une évaluation complète est multisensorielle et ne fait pas appel qu'au seul sens de la vue. Lors de l'évaluation d'un produit réel, tous nos sens sont sollicités afin d'interagir directement avec le produit. Ces dix dernières années, de grandes avancées ont été réalisées dans le domaine des interfaces de réalité virtuelle. Les interfaces haptiques par exemple, permettent à l'utilisateur de simuler le toucher d'un produit virtuel et ainsi de ressentir sa consistance, sa texture ou son poids. Les modalités sensorielles permettent une meilleure immersion de l'utilisateur dans l'EV et une interaction plus naturelle avec le produit. Étant donnée que le prototypage physique est long et coûteux à réaliser, le prototypage virtuel semble être une alternative intéressante. Cependant, les technologies de la RV nous permettent-elles de remplacer le prototypage physique par le prototypage virtuel ? L'expérimentation suivante a pour objectif de valider notre quatrième hypothèse, selon laquelle le prototype virtuel n'est pas encore substituable au prototype physique pour l'évaluation multisensorielle de produits, dans l'état actuel des technologies.

4.4 Expérimentation 3 "Prototype Physique/ Prototype Virtuel"



4.4.1 Contexte

Nous avons vu dans l'état de l'art que la maquette virtuelle est déjà utilisée avec succès en remplacement de la maquette physique. Nous l'avons aussi vérifié à travers la première expérimentation. Cependant, l'utilisateur est passif face à cette maquette virtuelle [76]. Celle-ci ne permet qu'une évaluation visuelle du produit, elle ne permet pas d'évaluation multisensorielle des caractéristiques et des fonctionnalités du futur produit.

Le prototype physique (PP) et le prototype virtuel (PV) sont des représentations intermédiaires permettant, entre autres, d'évaluer les caractéristiques et les fonctionnalités d'un produit pendant sa phase de conception. L'utilisation de prototypes est une activité qui peut déterminer le succès ou l'échec de la mise sur le marché d'un nouveau produit. Le PP peut cependant s'avérer très long et coûteux à réaliser, surtout si des modifications tardives sont nécessaires. Le PV permet de fortes économies de temps et d'argent, on peut donc se demander s'il n'est pas préférable de substituer le PV au PP.

Cette expérimentation a pour but de comparer l'utilisation de ces deux représentations intermédiaires pour l'évaluation d'un produit. Notre étude a pour objectif d'étudier dans quelle mesure le prototype virtuel peut remplacer le prototype physique. Pour cela, un prototype physique de collecteur de déchet à tri sélectif de cuisine est évalué selon plusieurs critères. Ensuite, un prototype virtuel du même produit est évalué selon les mêmes critères (Figure N° 78).

4.4.2 Introduction

Les délais et les coûts importants de conception d'un nouveau produit sont des contraintes majeures pour une entreprise voulant innover. Ces contraintes sont en partie dues à la nécessité de réaliser de multiples prototypes physiques. En effet, lors de l'évaluation de ces prototypes physiques, si un défaut de conception est constaté, il faut à nouveau réaliser d'autres PP, tout aussi coûteux et longs à fabriquer ou se passer de cette phase et prendre le risque d'un défaut de conception.

Il y a différents niveaux de représentation du produit [41] et la RV est un outil qui permet de modéliser des représentations intermédiaires virtuelles telles que le prototype virtuel. Plus qu'une maquette virtuelle, le PV permet de mettre en situation le produit et d'interagir directement avec celui-ci, avant sa fabrication. Le PV permet de rassembler les différents acteurs du projet, autour d'une perception commune du produit. Cette perception commune permet d'améliorer la compréhension et l'évaluation du produit, facilitant ainsi les prises de décisions. De plus, puisque le prototype est virtuel, il est plus rapide et moins coûteux de faire des modifications. Étant donné les avantages évidents du PV, pourquoi ne pas le substituer au PP ?

Afin d'étudier cette question, nous comparons l'utilisation de ces deux représentations intermédiaires à travers une expérimentation qui consiste à évaluer un même produit, selon les mêmes critères, en utilisant un PP dans un premier temps et un PV dans un second temps. Le produit à évaluer est un collecteur de déchet à tri sélectif de cuisine (Figure N° 78). Ce produit permet de trier 3 flux (ordures ménagères, emballages légers et verre) simultanément pour un encombrement minimum au sol.



Figure N° 78. Prototype Physique (à gauche) et Prototype Virtuel (à droite)

4.4.3 Participants

Quinze participants âgés de 22 à 35 ans (moyenne=24.8; Écart Type=3.2) ont pris part à l'évaluation du prototype physique. Il y a 7 femmes et 8 hommes. Tous les participants sont droitiers et n'ont pas connaissance des objectifs de cette expérimentation.

Quinze nouveaux participants âgés de 21 à 27 ans (moyenne=23; Écart Type=1.6) ont pris part à l'évaluation du prototype virtuel. Il y a 6 femmes et 9 hommes. Tous les participants sont droitiers et n'ont pas connaissance des objectifs de cette expérimentation.

4.4.4 Dispositifs Expérimentaux

Pour l'évaluation du prototype virtuel, nous utilisons une interface haptique (PHANTOM Omni de Sensable Technologies [171]) pour traquer avec précision la position de la main de l'utilisateur et pour permettre aux utilisateurs de manipuler le prototype virtuel. Les participants manipulent l'extrémité de l'interface d'interaction comme un stylo, avec leur main dominante (Figure N° 79).



Figure N° 79. Dispositifs expérimentaux

La scène virtuelle (Figure N° 80) est composée d'un personnage virtuel, du prototype virtuel et d'un avatar en forme de sphère. Le personnage virtuel a une taille moyenne de 180cm et sert d'échelle de comparaison pour estimer les dimensions du collecteur. Pour

visualiser la scène, nous avons utilisé un écran monoscopique de 19", avec une fréquence de rafraîchissement de 85Hz (Figure N° 79).

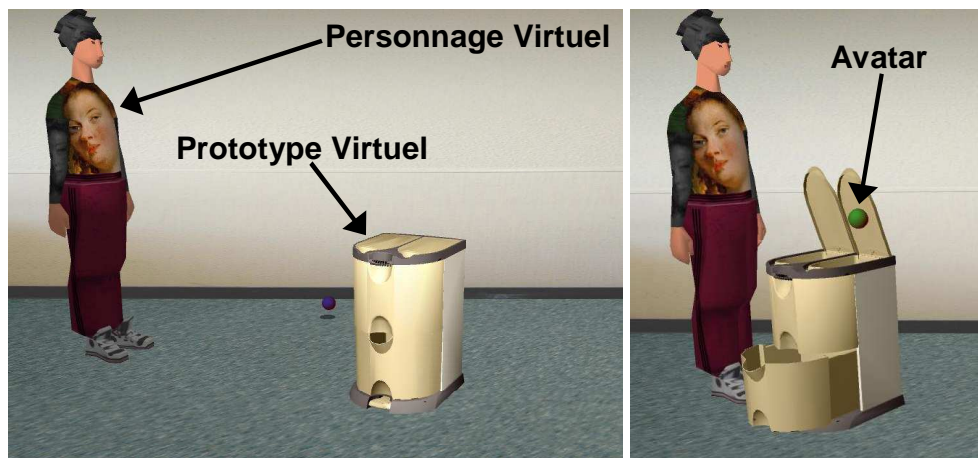


Figure N° 80. Scène virtuelle

4.4.5 Procédure

Pour évaluer le PP du collecteur, les participants sont isolés dans une pièce afin d'être préservés d'éventuelles influences extérieures et d'accroître ainsi leur concentration. Les participants ont comme seule consigne d'évaluer le collecteur de déchets, ils ne soupçonnent pas la finalité de cette expérimentation. De plus, une fois que le participant a terminé son évaluation et a commencé à remplir le questionnaire, il n'a plus accès au collecteur.

Pour évaluer le PV du collecteur, les participants sont assis devant l'écran et l'interface haptique est placée devant eux (Figure N° 79). Les participants utilisent le PHANToM Omni avec leur main dominante, tandis que leur autre main manipule le clavier. Pour chaque participant, l'expérimentation se déroule en trois phases : une phase de prise en main de l'interface haptique, une phase d'évaluation visuelle et une phase d'évaluation haptique.

Prise en main : La première phase permet aux participants de se familiariser avec l'interface haptique. Les participants réalisent une application ludique qui consiste à faire sortir un personnage virtuel d'un labyrinthe (Figure N° 81). Pour ce faire, ils utilisent le clavier et l'interface haptique. Le clavier permet de contrôler les déplacements du personnage. L'interface haptique contrôle les mouvements de l'avatar en forme de sphère, permettant d'écarter les obstacles. Pour écarter un obstacle, les participants positionnent l'avatar en contact avec l'obstacle et pressent le bouton bleu de l'interface haptique.

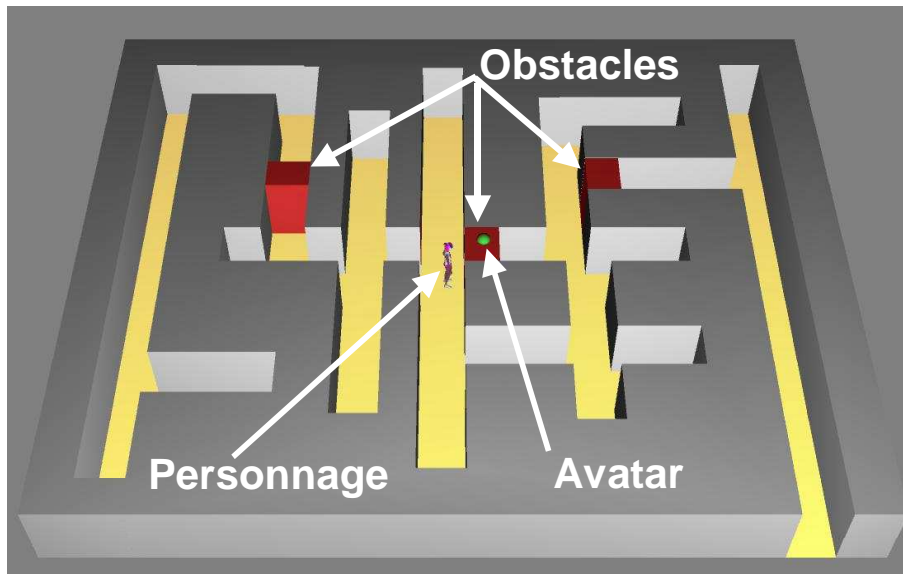


Figure N° 81. Application ludique pour la prise en main de l'interface haptique

Évaluation visuelle : Cette deuxième phase permet aux participants d'évaluer visuellement le prototype virtuel. Les participants utilisent le clavier et l'interface haptique pour interagir avec le PV. Les déplacements du PV dans l'environnement virtuel sont gérés au clavier. L'interface haptique est utilisée pour contrôler l'avatar en forme de sphère. Celui-ci permet d'ouvrir et de refermer les trois bacs du collecteur. Pour ouvrir ou fermer un bac, les participants positionnent l'avatar en contact avec le bac et pressent le bouton bleu de l'interface haptique. Dans cette phase, l'interface haptique est utilisée en mode passif, sans retour d'effort. Pour aider les participants à se rendre compte du contact effectif entre l'avatar et un bac, l'avatar change de couleur passant du bleu au vert (Figure N° 80). Enfin, pour estimer les dimensions du collecteur, un personnage de taille moyenne (180 cm) est placé dans la scène virtuelle.

Évaluation haptique : Cette troisième et dernière phase permet aux participants d'évaluer tactilement le prototype virtuel. Les participants utilisent l'interface haptique en mode actif, avec retour d'effort, pour toucher le PV. Dans cette phase, le prototype virtuel est fixe et la seule interaction possible est l'interaction tactile (Figure N° 82).

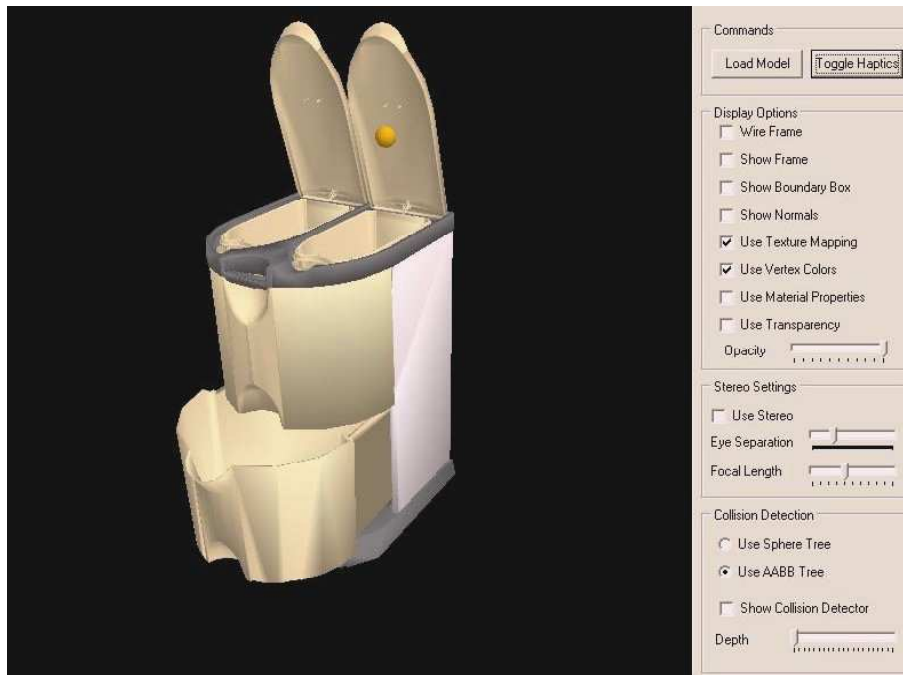


Figure N° 82. Evaluation haptique du prototype virtuel

4.4.6 Données collectées

Les données sont collectées sous la forme d'un questionnaire remis à chaque participant. Le questionnaire a été réalisé conformément à la méthode SDM (Semantic Differential Method) [139]. Les questions portent sur l'ergonomie, les fonctionnalités, l'esthétique, ainsi que sur d'autres caractéristiques du collecteur (Originalité, Forme, Couleur, Dimensions, Poids, Matériaux, Fonctionnalités, Mobilité, Robustesse, Qualité, Coût).

4.4.7 Résultats

Le Tableau N° 13 présente les notes moyennes sur dix que les participants ont attribué par critères d'évaluation, selon qu'ils ont utilisé un prototype physique ou un prototype virtuel. Le Tableau N° 14 présente les estimations moyennes des participants concernant les dimensions, les contenances et le poids du collecteur, en fonction du prototype utilisé.

Prototype	Originalité	Forme	Couleur	Dimension	Contenance	Matériaux	Fonctionnement des bacs	Mobilité	Robustesse	Qualité
Physique	6,60	6,27	5,33	6,77	5,73	7,60	6,84	8,30	6,90	6,77
Virtuel	6,07	6,40	6,27	6,80	5,87	5,20	7,18	6,07	7,13	6,53

Tableau N° 13. Notes moyennes par critère d'évaluation, en fonction du prototype utilisé

Prototype	Hauteur (cm)	Largeur (cm)	Profondeur (cm)	Contenance Bac 1 (litre)	Contenance Bac 2 (litre)	Contenance Bac 3 (litre)	Poids (kg)
Physique	96,07	48,80	53,93	7,67	7,67	16,13	7,67
Virtuel	76,00	41,80	47,00	8,13	8,13	16,47	3,83
Valeur réelle	75,00	45,50	54,00	17,00	17,00	40,00	11,20

Tableau N° 14. Estimations moyennes des caractéristiques du collecteur, en fonction du prototype utilisé

Nous avons réalisé une ANOVA pour chaque critère d'évaluation afin de déterminer s'il y a des différences statistiquement significatives (Figure N° 83). Nous observons plusieurs différences significatives qui concernent l'évaluation de la mobilité ($p(F=0.19) < 0.004$; $p(t=2.9) < 0.007$), les matériaux composant le collecteur ($p(F=8.286) < 0.0003$; $p(t=3.938) < 0.0005$), l'estimation de la hauteur ($p(F=0.319) < 0.04$; $p(t=3.459) < 0.002$) et le poids ($p(F=4.0) < 0.01$; $p(t=3.63) < 0.001$) du collecteur. Nous constatons également une différence, mais peu significative, concernant l'estimation du prix du collecteur (PP=50.60euros; PV=38.47euros) et les intentions d'achat (PP=40%; PV=66.67%). Enfin nous remarquons un écart important entre l'estimation de la contenance des bacs et la contenance réelle de ceux ci. Cependant cet écart est similaire pour les deux prototypes.

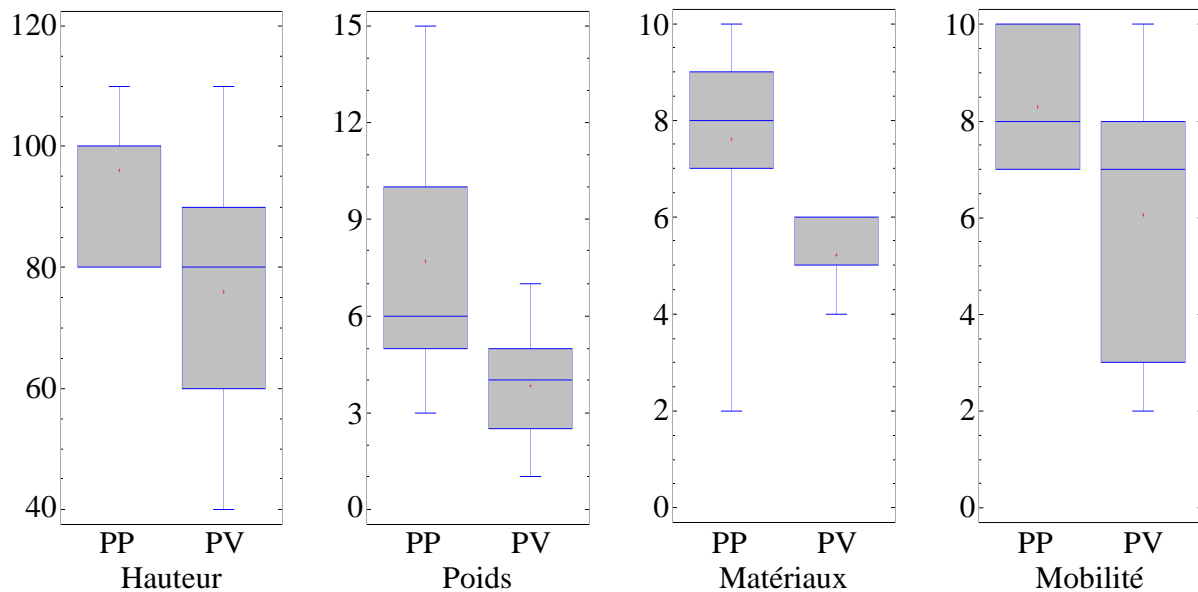


Figure N° 83. Différences statistiquement significatives (ANOVA)

4.4.8 Analyse des résultats

Nos résultats révèlent plusieurs différences significatives entre l'utilisation d'un prototype physique et l'utilisation d'un prototype virtuel, pour l'évaluation de notre collecteur de déchets à tri sélectif de cuisine.

Une première différence concerne l'évaluation de la mobilité du collecteur. Ce collecteur de déchets possède quatre roulettes pivotantes, permettant une mobilité optimale. Cela explique probablement la satisfaction des participants concernant la mobilité du prototype physique. Par contre, les participants ont beaucoup moins apprécié la mobilité du prototype virtuel. Cela est probablement dû à la gestion au clavier, moins "naturelle", des déplacements du prototype virtuel.

Nous constatons également une différence dans l'évaluation des matériaux dont le collecteur est composé. Le corps du collecteur est en métal et les autres composants sont en plastique. Les participants qui ont évalué le prototype physique ont remarqué que le collecteur est composé de plusieurs matériaux et en sont satisfaits. A l'inverse, les participants qui ont évalué le prototype virtuel, n'ont pas distingué ces différents matériaux. Cette différence a probablement deux origines. Tout d'abord, il est difficile de faire visuellement la distinction entre les matériaux composants le collecteur. Cette distinction est par contre évidente par une évaluation tactile. Ensuite, le prototype virtuel est évalué tactilement à l'aide d'une interface

haptique, qui ne permet qu'un retour d'effort ponctuel, très éloigné du ressenti physique et tactile permis par une main humaine.

Ensuite, une différence inattendue est celle de l'estimation de la hauteur du collecteur. Les participants qui ont utilisé un prototype physique, estiment le collecteur beaucoup plus grand qu'il ne l'est réellement (+21.07 cm). Les participants qui ont utilisé un prototype virtuel donnent une bonne estimation de la hauteur du collecteur (+1 cm). Cette différence provient peut être du fait que, pour l'évaluation du prototype virtuel, un personnage virtuel est utilisé. Ce personnage virtuel a une taille moyenne de 180 cm et sert d'échelle de mesure pour estimer les dimensions du collecteur. Il est probablement plus facile pour les participants de comparer le collecteur à un élément extérieur (le personnage), qu'à eux-mêmes.

Par contre, le poids du collecteur est beaucoup mieux estimé par les participants qui ont évalué le prototype physique (-3.53 kg), que par les participants qui ont évalué le prototype virtuel (-7.37 kg). Cette différence n'est pas étonnante et était même prévisible, car le poids du prototype virtuel n'est pas simulé. Les participants utilisant le prototype virtuel ne peuvent estimer que visuellement le poids du collecteur.

Nous avons également remarqué une sous estimation (-42 litres) des contenances du collecteur. Cependant, cette sous-estimation est commune à tous les participants, quel que soit le prototype utilisé.

Il a aussi été demandé aux participants de donner une estimation du prix de ce collecteur et de préciser s'ils sont tentés par l'achat d'un tel produit. Bien que statistiquement non significatif, il est intéressant de constater que le PP est estimé en moyenne 12.13 euros plus cher que le PV. De plus, il y a 26.67% d'intentions d'achat de plus pour le PV. Ces différences proviennent probablement du fait que les participants ont estimé que le PP est plus grand et plus lourd que le PV.

4.4.9 Conclusion

Cette expérimentation a pour but de comparer l'utilisation du prototype physique et du prototype virtuel, pour l'évaluation d'un produit. Notre étude a pour objectif d'étudier dans quelle mesure le prototype virtuel peut remplacer le prototype physique. Pour cela, nous avons fait évaluer deux prototypes de collecteur de déchet à tri sélectif de cuisine. Un premier

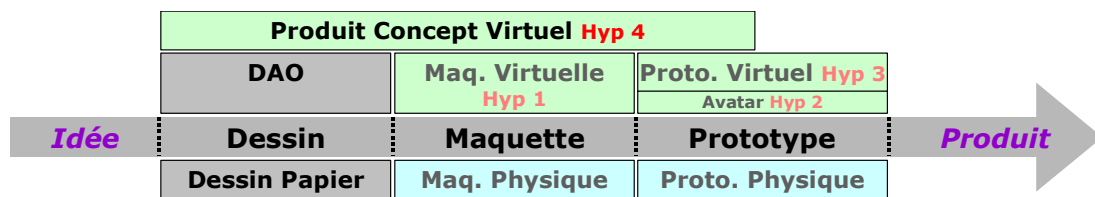
groupe de participants a évalué un prototype physique et le second groupe a évalué un prototype virtuel, selon les mêmes critères.

Les résultats révèlent un certain nombre de différences significatives entre les deux évaluations. Les différences qui ont désavantagé le PV concernent la mobilité du collecteur, la distinction des différents matériaux composant le collecteur et la perception du poids du collecteur. Ces points faibles du prototype virtuel sont dus principalement aux interfaces utilisées pour manipuler et évaluer tactilement le PV.

Nos résultats suggèrent que le prototype virtuel est très utile et peut remplacer le prototype physique pour l'évaluation visuelle et fonctionnelle d'un produit. Cependant, le prototype physique reste nécessaire en complément du PV, car les interfaces de réalité virtuelle actuelles et en particulier les interfaces haptiques, ne permettent pas d'égaliser l'évaluation tactile permise par l'utilisation d'un prototype physique. Les évaluations d'un nouveau produit, menées seulement à l'aide de prototypes virtuels, pourraient dans certains cas induire les concepteurs en erreur et leur faire faire de mauvais choix de conception. En attendant des interfaces de RV plus performantes, qui permettront une interaction plus naturelle et un toucher plus réaliste, une utilisation complémentaire des prototypes physiques et virtuels semble nécessaire.

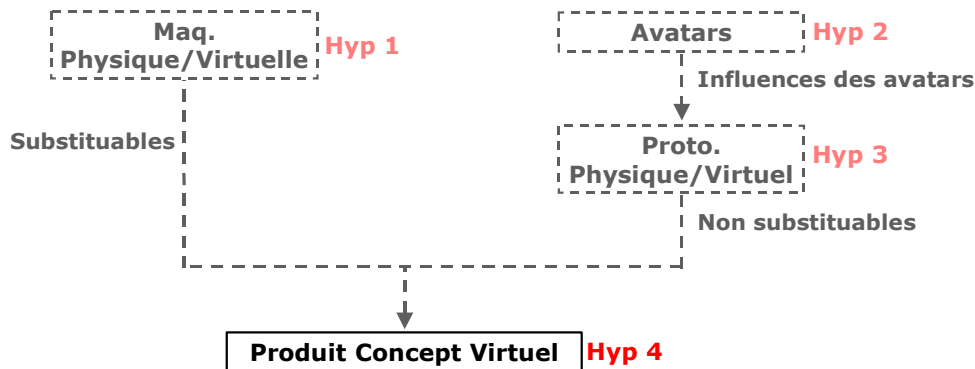
Cette troisième expérimentation semble donc valider notre troisième hypothèse, selon laquelle le prototype virtuel n'est pas substituable au prototype physique pour l'évaluation de produits. Ces résultats sont toutefois à considérer dans le cadre de cette expérimentation, avec les choix logiciels et matériels qui ont été faits. Dans l'expérimentation suivante, nous proposons une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle évolutive, qui permet l'évaluation de concepts de produits tout au long des phases amonts du processus de conception : Le Produit Concept Virtuel (PCV).

5 Expérimentation 4 "Le Produit Concept Virtuel (PCV)"



5.1 Contexte

Au vu de nos connaissances et des résultats des expérimentations précédentes, nous avons réalisé une quatrième expérimentation concernant le Produit Concept Virtuel (PCV). Le PCV est une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle évolutive que nous proposons, pour l'évaluation de concepts de produits tout au long des phases amonts du processus de conception.



Cette étude est le fruit de notre collaboration avec l'entreprise ROSSIGNOL SA, spécialisée dans les collecteurs de déchets. L'objectif est d'évaluer les apports des technologies de la réalité virtuelle au sein d'une PME (Petite ou Moyenne Entreprise), lors des phases amonts du processus de conception. Pour cela, nous avons utilisé la RV dans le processus d'évaluation classique. Nous avons défini une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle, le Produit Concept Virtuel (PCV). En plus de la définition du PCV, nous avons tenté de mettre en évidence les avantages d'une telle représentation virtuelle pour une PME. Le projet sur lequel se base notre collaboration est la réalisation d'un PCV de collecteur de déchets innovant.

5.2 Introduction

La conception de nouveaux produits est une tâche difficile, surtout pour les PME [80]. Ces dernières sont continuellement à la recherche de nouveaux outils et méthodes leur

permettant de mieux gérer les phases amonts de leur processus de conception et ainsi d'accroître leurs performances. Un de ces outils est le produit concept. D'après Delamarre et al [57], il est l'équivalent du « concept-car » pour les secteurs d'activité autre que celui de l'automobile. Il permet de stimuler les phases amont du processus de conception. Selon Chedmail et al [41], il y a différents niveaux de représentation du produit et la RV est un outil qui permet de modéliser des représentations intermédiaires virtuelles. Dans le cadre de notre collaboration avec l'entreprise ROSSIGNOL S.A., nous proposons une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle évolutive, le Produit Concept Virtuel (PCV). Le PCV permet l'évaluation de concepts de produits tout au long des phases amonts du processus de conception. Il permet de mettre en situation le futur produit et d'évaluer ses fonctionnalités. Il permet ainsi de rassembler les différents acteurs d'un projet, autour d'une perception commune du concept de produit, ce qui améliore la compréhension et l'évaluation du produit et facilite la prise de décision. De plus, puisque le produit et son environnement sont virtuels, il est très facile et peu coûteux de faire des modifications, si un défaut est constaté lors de leurs évaluations.

L'idée de base du PCV est de remplacer les différentes représentations intermédiaires physiques et virtuelles par une seule et même représentation virtuelle, le Produit Concept Virtuel (Figure N° 84). Ce PCV évolue tout au long des phases amonts du processus de conception, en fonction des besoins des concepteurs et des décisions prises après les phases d'évaluation. Les concepteurs disposent ainsi d'une représentation intermédiaire virtuelle ayant plusieurs niveaux de définition, selon qu'ils souhaitent évaluer l'esthétique, les fonctionnalités ou les matériaux composant le futur produit.

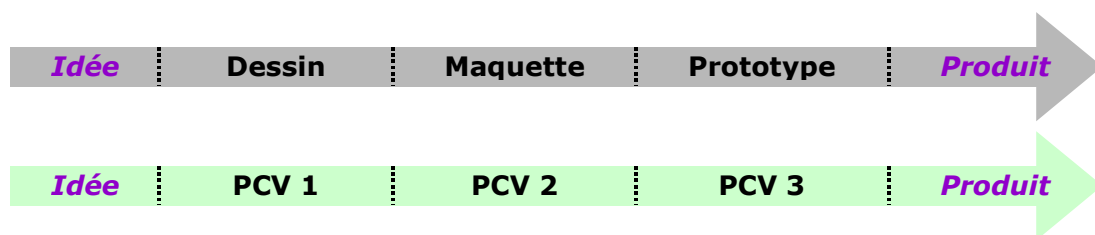


Figure N° 84. Produit Concept Virtuel

5.3 Objectifs

Ce projet a pour but de concevoir et d'évaluer un Produit Concept Virtuel de collecteur de déchets, en collaboration avec les concepteurs de l'entreprise ROSSIGNOL S.A. Cette démarche s'est déroulée en deux phases : une première phase de transfert de connaissances et de formation et une deuxième phase d'accompagnement scientifique et technique permettant la mise en pratique de ces connaissances.

Comme nous l'avons vu précédemment, les représentations virtuelles sont très utiles pour évaluer le futur produit au plus tôt, dans les premières phases du processus de conception. La maquette virtuelle est très intéressante pour évaluer visuellement l'esthétique du produit. Cependant, l'utilisateur est passif face à cette maquette virtuelle [76]. Celle-ci ne permet qu'une évaluation visuelle du produit, elle ne permet pas d'évaluer les fonctionnalités du futur produit, ni de mettre en situation le produit dans son futur environnement. Le prototype virtuel permet aux concepteurs d'évaluer les caractéristiques et les fonctionnalités du produit, grâce à une interaction multimodale et une immersion multisensorielle. Néanmoins, le prototype virtuel est à ce jour très peu utilisé dans les entreprises. Cela peut s'expliquer par le fait que le prototypage virtuel nécessite un investissement dans l'achat d'interfaces de RV, dont le coût n'est pas négligeable. De plus, l'utilisation de ces interfaces de RV (gants de données, traqueurs, interfaces haptiques, ...) nécessite certaines compétences en informatique et en électronique, que les PME ne possèdent pas toujours en interne. Ensuite, l'expérimentation précédente a révélé que l'évaluation tactile du prototype virtuel n'était pas concluante. C'est pourquoi nous avons réalisé un PCV permettant de mettre en situation le futur produit dans un EV adéquat et d'évaluer ses fonctionnalités, sans toutefois permettre l'évaluation tactile du futur produit.

Dans ce projet, nous étions en attente de pouvoir valider nos hypothèses de recherche en menant une expérimentation au sein d'une PME. Nous avons plusieurs objectifs :

- Utiliser le PCV dans les phases amont du processus de conception d'une PME ;
- Rassembler différents corps de métiers autour du PCV ;
- Déterminer les apports du PCV ;
- Évaluer l'intégration de la RV au sein de la PME.

La PME ROSSIGNOL S.A. était en attente d'acquérir les compétences lui permettant de développer elle-même des concepts de produits, afin de :

- Stimuler sa créativité et développer des produits innovants ;
- Faciliter la collaboration inter métiers ;
- Mettre à jour son processus de conception et communiquer sur de ses nouvelles compétences.

5.4 Participants

Le projet rassemble dix participants, six concepteurs issus de la PME ROSSIGNOL S.A. et quatre chercheurs du laboratoire P&I.

5.5 Protocole de réalisation et d'évaluation du PCV

Le PCV permet de mettre en situation le futur produit dans un EV adéquat et d'évaluer visuellement ses caractéristiques et fonctionnalités à l'aide de scénarios interactifs. Il permet de rassembler les différents acteurs du projet, autour d'une perception commune du concept de produit. Cette perception collective permet d'améliorer la compréhension et l'évaluation du concept de produit, facilitant ainsi la prise de décision. De plus, puisque le produit et son environnement sont virtuels, il est très facile et peu coûteux de faire des modifications, si un défaut est constaté lors de son évaluation.

Le développement du PCV a été réalisé par le laboratoire P&I et a nécessité 20 jours homme. La Figure N° 85 illustre les étapes suivies pour la réalisation et l'évaluation du PCV.

1. Nous avons utilisé un modelleur (3Ds Max©) pour concevoir le modèle 3D du collecteur de déchets. Il a fallu pour cela, tenir compte des contraintes de temps réels de la RV. L'environnement virtuel contient plusieurs animations telles que l'écoulement d'une rivière et une fontaine à jet d'eau. De plus, il y a des personnages et des animaux dans l'environnement et leur mobilité est gérée avec le logiciel Virtools© ;
2. Nous avons ensuite intégré le modèle 3D du collecteur dans son EV ;
3. Des scénarios permettent de mettre en évidence les fonctionnalités du collecteur ;

- Enfin, l'équipe de concepteurs a évalué le PCV en observant les fonctionnalités du collecteur et ses interactions avec l'EV. Cette étape a donné lieu à de multiples modifications du PCV, jusqu'à ce que le PCV corresponde aux attentes des concepteurs. Les modifications ont été réalisées en moins d'une journée, puisque le produit et son environnement sont virtuels.

Après une évaluation satisfaisante du PCV, la réalisation d'un prototype physique peut être envisagée sans l'appéhension de devoir réaliser de multiples modifications.

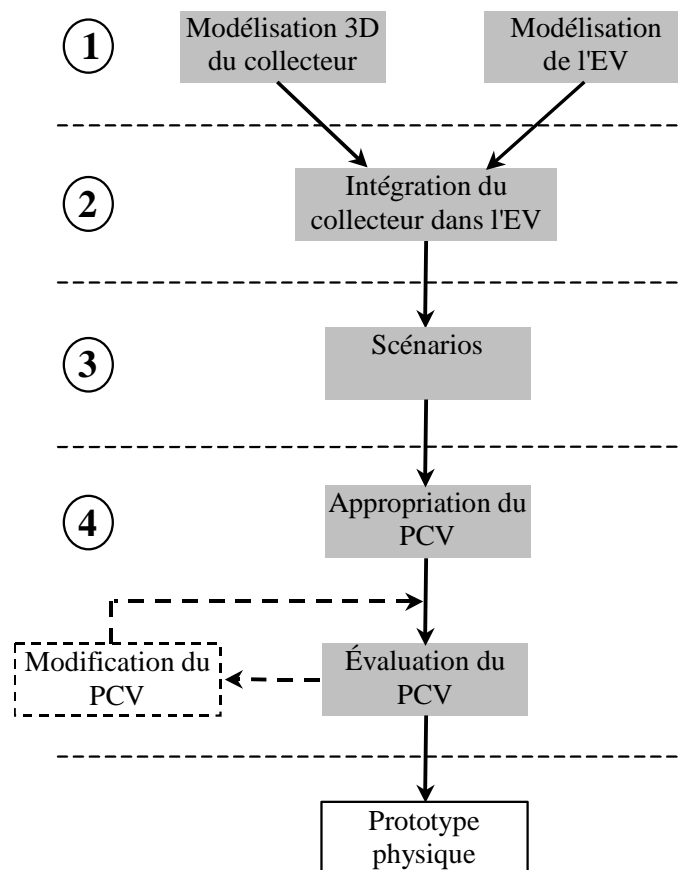


Figure N° 85. Etapes de réalisation et d'évaluation du PCV

5.6 Description du PCV

5.6.1 Virtualisation des fonctionnalités du collecteur

Le PCV réalisé est un collecteur de déchets innovant d'extérieur. Ce collecteur possède cinq fonctionnalités originales :

- Mobilité et autonomie ;

- Communication interactive ;
- Gestion des obstacles ;
- Fonction répulsive pour animaux ;
- Déchargement automatique des déchets.

La première fonctionnalité du collecteur de déchets est sa mobilité et son autonomie. Ce collecteur de déchets n'est pas destiné à rester fixe, mais au contraire à se mouvoir le long d'un parcours prédéfini. Pour cela, nous avons défini l'itinéraire suivi par le collecteur, dans un parc d'attraction représentant un village médiéval (Figure N° 86). L'objectif n'est pas de faire un EV réaliste, mais de réaliser un EV permettant d'avoir une idée claire du produit et de ses interactions avec son futur environnement.



Figure N° 86. Environnement Virtuel du collecteur de déchets

La seconde fonctionnalité est une communication interactive. Le collecteur est muni d'un écran interactif pour communiquer avec les utilisateurs et leur fournir des informations telles que son niveau de charge, la température extérieure, l'ensoleillement et bien d'autres informations. Pour mettre en évidence cette fonctionnalité, un scénario a été réalisé durant lequel un personnage met un déchet dans le collecteur. Ce dernier ayant atteint sa charge maximale, le fait savoir par l'intermédiaire d'un message sur son écran (Figure N° 87).



Figure N° 87. Interface de communication

La troisième fonctionnalité est la gestion des obstacles par le collecteur. Cela permet au collecteur de s'arrêter dès qu'il détecte un obstacle, évitant ainsi de se détériorer ou de blesser quelqu'un. Le collecteur reprend son parcours dès qu'il n'y a plus d'obstacle. Pour mettre en évidence cette fonctionnalité, nous avons placé un second personnage sur le parcours du collecteur. Les déplacements de ce personnage sont contrôlés afin d'évaluer le comportement du collecteur (Figure N° 88).



Figure N° 88. Gestion des obstacles

La quatrième fonctionnalité est la fonction répulsive pour animaux. Le collecteur possède un système à ultra son qui permet de repousser les animaux qui pourraient nuire à son bon fonctionnement en allant fouiller dans les ordures par exemple. Pour expliquer le

fonctionnement de cette fonctionnalité, nous avons modélisé la sphère de répulsion autour du collecteur, ainsi qu'un oiseau et un chat (Figure N° 89). Les animaux peuvent être envoyés à tout moment en direction du collecteur, afin de se rendre compte de leur comportement face au système de répulsion. La sphère de répulsion n'est perceptible que par les animaux, donc pour la percevoir nous devons basculer en vue subjective de l'un des animaux et ainsi voir ce qu'il perçoit.



Figure N° 89. Sphère de répulsion pour animaux

La cinquième fonctionnalité est la capacité du collecteur à détecter que sa charge maximale est atteinte et à aller se décharger automatiquement dans un conteneur prévu à cet effet. De cette manière, aucune maintenance n'est nécessaire concernant l'évacuation des déchets. Pour mettre en évidence cette fonctionnalité, nous avons modélisé le conteneur de déchets et mis en place un scénario d'évacuation des déchets. Une fois que le collecteur est plein, il le signale via son écran (Figure N° 87) et se dirige vers le conteneur pour décharger son contenu (Figure N° 90). Pour une meilleure appréciation de la phase de déchargement, nous avons fait apparaître le conteneur en transparence.

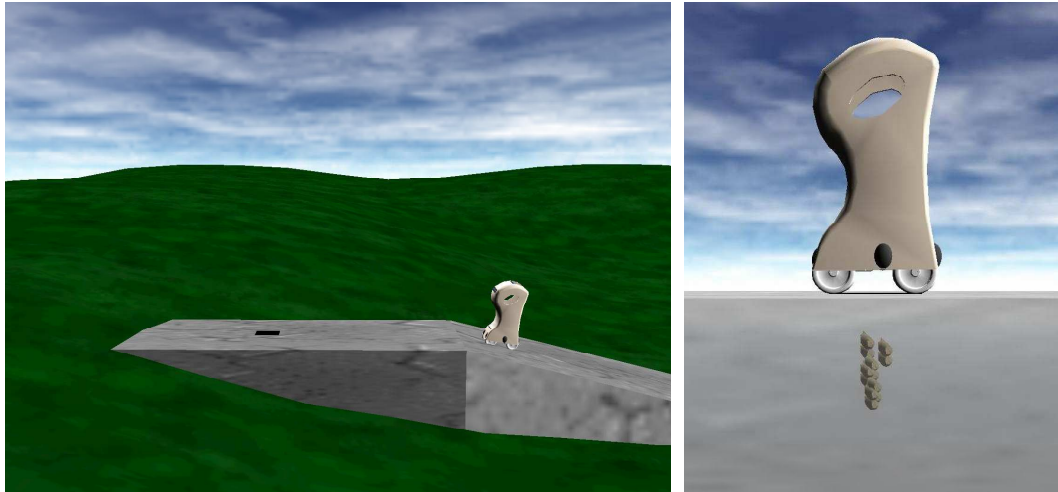


Figure N° 90. Evacuation automatique des déchets

5.6.2 Aide logicielle comportementale (ALC)

Une autre contribution de la RV est l'utilisation d'aides logicielles comportementales (ALC). Fuchs [76] définit l'ALC comme une Aide Logicielle Comportementale programmée, qui apporte une aide mentale pour l'accomplissement de la tâche par l'utilisateur. Deux ALC sont utilisées pour notre PCV. Celles-ci nous permettent d'avoir accès à des points de vue ou à des représentations difficilement envisageables dans la réalité et améliorent ainsi la compréhension du PCV.

La première ALC concerne le point de vue de l'utilisateur. Dans l'EV, il y a sept caméras sur lesquelles il est possible de basculer à tout moment : deux vues subjectives des deux avatars humains, deux vues subjectives des deux animaux, une vue subjective du collecteur (Figure N° 91), une vue globale suivant le trajet du collecteur et une vue globale utilisée pour naviguer librement dans l'EV. Le collecteur peut donc être observé sous tous les angles. Cette ALC permet aux participants d'avoir une représentation claire et collective du collecteur. Cette aide logicielle comportementale a été reconnue par les concepteurs de l'équipe ROSSIGNOL S.A. comme une bonne contribution à l'appréciation globale du concept de produit.



Figure N° 91. Vue subjective du collecteur de déchets

La seconde ALC est la matérialisation de la sphère de répulsion pour animaux (Figure N° 89). Par cette représentation, l'application permet, en vue subjective animale, de voir la sphère de répulsion autour du collecteur. Une sphère translucide délimite le champ d'action du système de répulsion à ultra son. La représentation de la sphère répulsive montre l'impact de la fonction répulsive pour animaux de manière explicite, ce qui aurait été difficile à réaliser avec une représentation physique.

5.7 Données collectées

Les données ont été collectées à l'aide de deux questionnaires.

Le premier questionnaire a été remis à chacun des membres du groupe de conception, composé de 6 concepteurs issus de l'entreprise ROSSIGNOL S.A. Ce questionnaire a pour objectif de déterminer s'ils ont constaté un impact du PCV sur :

- Le travail en équipe ;
- La compréhension du concept de produit ;
- L'évaluation du concept de produit ;
- La prise de décision.

Le second questionnaire a été remis à 14 étudiants de Master. Ces étudiants n'ont pas participé au projet ROSSIGNOL S.A. et n'ont aucune connaissance du PCV développé, ni des objectifs de notre étude. Leur compréhension du concept de produit ne peut donc être issue que de la visualisation du PCV. Avant de remplir le questionnaire, les étudiants ont visualisé la dernière version du PCV sur un écran immersif de 2,5 m de haut sur 3 m de large. Cette visualisation a duré 5 minutes et n'a été accompagnée d'aucune explication. Le questionnaire a pour objectif d'évaluer le niveau de compréhension des fonctionnalités du PCV, par les étudiants.

5.8 Résultats

Il ressort de l'analyse du premier questionnaire remis aux concepteurs et de nos propres observations, que bien qu'il y ait eu au début du projet quelques appréhensions à utiliser les technologies de la RV, cela a été un facteur de motivation pour les participants. En effet, l'aspect ludique de la RV a permis une adhésion plus facile des participants et a suscité leur intérêt. Le PCV a permis de concevoir une représentation commune du concept de produit, que chacun a pu facilement s'approprier. Il a été possible de réaliser de multiples cycles d'évaluations et prises de décisions qui ont orienté les choix de conception concernant les fonctionnalités du concept de produit. De plus, nous avons constaté une stimulation de la créativité de l'équipe.

L'utilisation d'aides logicielles comportementales (ALC) a été un facteur de réussite de ce projet, car les ALC peuvent aider à la compréhension du concept de produit. Avec les vues subjectives, le concepteur peut percevoir le point de vue des personnages de la scène ou même du produit lui-même. Une autre contribution des aides logicielles comportementales est de représenter un composant non réel dans l'environnement, tel que le champ d'action du système de répulsion. Cette possibilité de modéliser ces aspects habituellement non visibles est très importante pour la communication et la valorisation des idées innovantes.

Pour étudier le second questionnaire remis aux étudiants, nous avons utilisé une Analyse en Composante Principale ACP (Annexe N° 2.2), suivie d'une classification ascendante hiérarchique CAH (Annexe N° 2.3). Cette étude nous a permis d'une part de détecter les corrélations entre les questions, qui ont été regroupées en cinq thèmes correspondants aux cinq fonctionnalités du concept de produit. D'autre part, nous avons pu réaliser une classification des étudiants, en fonction de leur compréhension du PCV.

La Figure N° 92 représente le niveau de compréhension moyen des fonctionnalités du concept de produit par les étudiants. On remarque que les trois premières fonctionnalités sont assez bien comprises. Le déchargement automatique est parfaitement compris, par contre la fonction répulsive pour animaux est quant à elle très mal comprise. L'incompréhension de la fonction répulsive pour animaux vient principalement de la mauvaise interprétation de la sphère de répulsion englobant le collecteur. En effet 71,4% des étudiants pensent que cette sphère de répulsion représente la zone de détection des obstacles du collecteur.

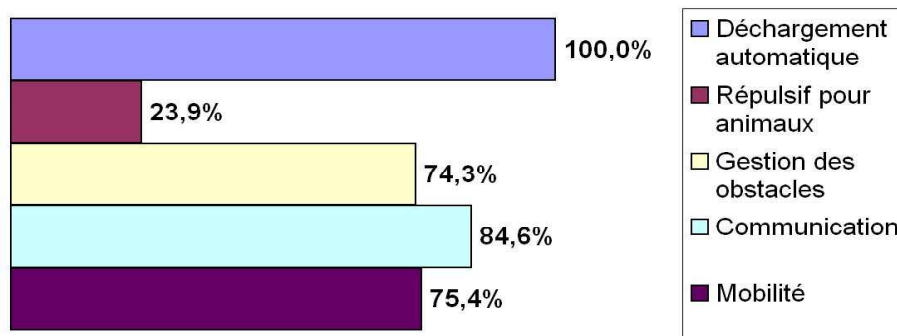


Figure N° 92. Niveau moyen de compréhension des fonctionnalités

La Figure N° 93 est un dendrogramme qui représente clairement le classement des étudiants selon leur compréhension du PCV.

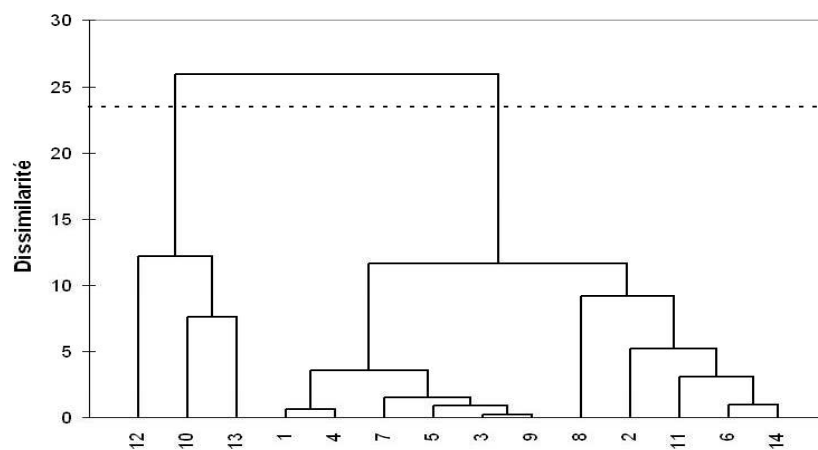


Figure N° 93. Dendrogramme

La ligne en pointillé représente la troncature permettant de visualiser les 2 groupes identifiés. Le premier groupe représente 21,4% des étudiants, ceux-ci ont bien compris les cinq fonctionnalités du concept de produit. Le deuxième groupe représente 78,6% des

étudiants. Les étudiants de ce groupe ont la particularité de ne pas avoir compris la fonction répulsive pour animaux, alors qu'ils ont bien compris les autres fonctionnalités.

Les résultats des deux questionnaires montrent que globalement les étudiants n'ont pas compris la fonction répulsive pour animaux, alors que les concepteurs n'ont eu aucun problème de compréhension des fonctionnalités du concept de produit. Cela s'explique par le fait que les concepteurs, qui ont participé au projet, avaient connaissance de toutes les fonctionnalités du concept de produit, avant la visualisation du PCV. A l'inverse, les étudiants, qui n'ont pas participé au projet, n'avaient connaissance d'aucune des fonctionnalités du concept de produit, avant la visualisation du PCV. Nous en déduisons donc que notre PCV nécessite des explications complémentaires à sa visualisation, pour une présentation auprès de personnes extérieures au projet.

5.9 Conclusion

Cette collaboration avec l'entreprise ROSSIGNOL S.A. a pour objectif d'évaluer les apports des technologies de la RV au sein d'une PME, lors des phases amonts du processus de conception. Pour cela, nous avons intégré les technologies de la RV dans le processus de conception classique, en proposant une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle, le PCV. Dans ce projet, différents corps de métiers ont travaillé ensemble à la conception d'un collecteur de déchets innovant et la RV a été une nouvelle technologie pour toute l'équipe de concepteurs. Les participants de ce projet ont pu ensemble découvrir les possibilités de cette nouvelle technologie et créer un vocabulaire commun, qui est la base d'une bonne collaboration. L'utilisation du PCV a permis de rassembler les différents acteurs du projet, autour d'une perception commune du concept de produit, améliorant ainsi la compréhension et l'évaluation du concept de produit. Il a aussi été possible de multiplier les cycles d'évaluations et prises de décisions qui orientent les choix de conception. Cela aurait été plus long et plus coûteux à réaliser avec des maquettes physiques, surtout étant donné le niveau de complexité électronique du collecteur innovant, domaine non maîtrisé par ROSSIGNOL S.A.

A ce jour, ROSSIGNOL S.A. utilise le PCV pour communiquer en interne autour de son concept de produit. En effet, la représentation virtuelle d'un concept de produit est bien plus parlante qu'un texte explicatif, même si notre PCV n'a pas un haut degré de réalisme. L'expérience menée auprès des étudiants a montré que certaines fonctionnalités du produit, peuvent ne pas être comprises par les personnes extérieures au projet. Le PCV réalisé n'a

donc pas été utilisé pour une communication en externe. Le PCV constitue un réservoir d'idées innovantes. C'est ainsi que deux des fonctionnalités du concept de produit (le système de répulsion et le déchargement automatique) ont été intégrées dans d'autres produits de la nouvelle gamme de collecteurs ROSSIGNOL S.A.

Cette quatrième expérimentation semble donc valider partiellement notre quatrième hypothèse, d'après laquelle le PCV est une représentation intermédiaire virtuelle évolutive, qui permet l'évaluation de concepts de produits tout au long des phases amonts du processus de conception. Une étude complémentaire est nécessaire afin de comparer l'utilisation du PCV et des représentations virtuelles existantes, pour l'évaluation de produits.

6 Synthèse et Apports

Cette thèse porte sur l'utilisation des représentations intermédiaires, dans les phases amonts du processus de conception de produits. Nous avons présenté les avantages et inconvénients des représentations intermédiaires traditionnelles et virtuelles. Nous avons ensuite mené à travers nos quatre expérimentations (Figure N° 94), une étude comparative de ces deux types de représentations intermédiaires pour l'évaluation de produits, ce qui nous a amené à proposer une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle. L'objectif de ces travaux est d'étudier dans quelle mesure les représentations virtuelles peuvent remplacer les représentations physiques, comme outil d'évaluation du futur produit, dans les phases amonts du processus de conception.

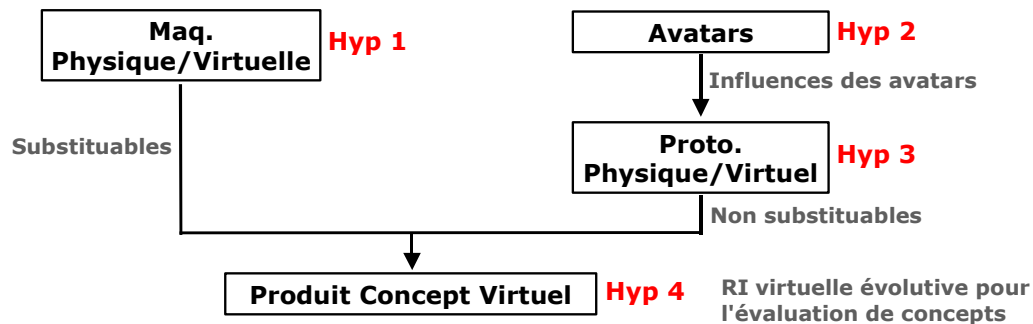


Figure N° 94. Expérimentations

La première expérimentation a pour but de comparer l'utilisation de la maquette physique et de la maquette virtuelle, pour l'évaluation d'un produit. Nous voulons par cette expérimentation, vérifier que la maquette virtuelle peut remplacer la maquette physique pour l'évaluation visuelle de produits. Pour cela, des maquettes physiques de collecteurs de déchets de cuisine, de ville et de salle de bain sont évaluées visuellement selon plusieurs critères. Ensuite, des maquettes virtuelles des mêmes produits sont évaluées selon les mêmes critères. Nos résultats suggèrent que les maquettes virtuelles sont aussi performantes que les maquettes physiques pour l'évaluation de nos collecteurs de déchets. Nous observons aussi qu'il peut être parfois préférable d'utiliser une maquette virtuelle pour évaluer certains aspects du produit tel que son encombrement. En effet, il est plus facile de se rendre compte de l'encombrement d'un produit lorsque celui-ci est intégré dans un environnement virtuel adéquat.

Nous avons vu précédemment qu'une propriété importante du prototypage virtuel est la possibilité d'interagir de façon multimodale avec le prototype virtuel. En conséquence,

préalablement à notre expérimentation sur le prototype virtuel, nous avons mené cette deuxième expérimentation pour nous assurer que les utilisateurs pourraient évaluer le prototype virtuel sans être influencés d'une manière ou d'une autre par les avatars utilisés. Dans cette étude, trois expériences sont conduites pour étudier l'influence de l'apparence visuelle des avatars sur la manipulation des objets virtuels et des interfaces réelles d'interaction en EV. Nos résultats suggèrent qu'une propriété visuelle de l'avatar représentant l'utilisateur dans un environnement virtuel peut influencer le comportement des participants durant une tâche de manipulation. L'indication de direction suggérée visuellement par l'avatar modifie à la fois la manière dont les participants saisissent un objet virtuel et la manière dont ils manipulent l'interface d'interaction. La non maîtrise d'une telle influence peut fausser l'évaluation d'un prototype virtuel, en influençant la stratégie de manipulation des utilisateurs. Inversement, la maîtrise de cette influence peut favoriser une utilisation optimale des interfaces d'interactions, telles que les interfaces haptiques ayant un débattement angulaire limité.

La troisième expérimentation a pour but de comparer l'utilisation du prototype physique et du prototype virtuel, pour l'évaluation d'un produit. Nous avons ainsi étudié dans quelle mesure le prototype virtuel peut remplacer le prototype physique. Pour cela, un prototype physique de collecteur de déchet à tri sélectif de cuisine a été évalué selon plusieurs critères. Ensuite, un prototype virtuel du même produit a été évalué selon les mêmes critères. Nos résultats montrent une évaluation visuelle comparable pour les deux prototypes. Cependant, il existe des différences significatives entre l'évaluation tactile du prototype physique et du prototype virtuel. C'est pourquoi nous pensons que le prototype physique reste nécessaire en complément du prototype virtuel, car les interfaces de réalité virtuelle actuelles et en particulier les interfaces haptiques, ne permettent pas de remplacer l'évaluation tactile permise par le prototype physique.

Au vu de nos connaissances et des résultats des expérimentations précédentes, nous avons réalisé une quatrième expérimentation concernant le Produit Concept Virtuel (PCV). Le PCV est une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle évolutive que nous proposons pour l'évaluation de concepts de produits tout au long des phases amonts du processus de conception. L'idée de base est de remplacer les différentes représentations intermédiaires physiques et virtuelles par une seule et même représentation virtuelle. Le PCV est une représentation virtuelle qui évolue tout au long des phases amonts du processus de

conception, en fonction des besoins des concepteurs et des décisions prises après les phases d'évaluation. Les concepteurs disposent ainsi d'une représentation intermédiaire virtuelle ayant plusieurs niveaux de définition, selon qu'ils souhaitent évaluer l'esthétique, les fonctionnalités ou les matériaux composants le futur produit. Les résultats ont révélé que l'utilisation du PCV permet de rassembler les différents acteurs du projet autour d'une perception commune. Ce qui améliore la compréhension du concept de produit, facilitant ainsi les prises de décisions. De plus, le PCV permet d'augmenter le nombre de cycles d'évaluation et de prise de décisions qui orientent les choix de conception. Cependant, nous constatons que certaines fonctionnalités du produit peuvent ne pas être comprises par des personnes extérieures au projet. Le PCV réalisé est donc utilisé pour une communication en interne. Enfin, le concept de produit n'a pas été fabriqué, car son but n'était pas d'être produit en série, mais de constituer un réservoir d'idées innovantes. C'est ainsi que deux des fonctionnalités du concept de produit (le système de répulsion et le déchargement automatique) ont été intégrées dans d'autres produits de la nouvelle gamme de collecteurs ROSSIGNOL S.A.

Nos recherches nous amènent à établir une liste de recommandations pour optimiser l'évaluation de produits, par l'utilisation des représentations intermédiaires virtuelles :

- Les représentations intermédiaires virtuelles sont très utiles durant tout le processus de conception de produits, particulièrement lors des phases d'évaluation des concepts de produits ;
- La maquette virtuelle semble pouvoir se substituer à la maquette physique pour l'évaluation visuelle d'un produit. Elle est dans ce cas aussi utile que la maquette physique et permet des économies importantes de temps et d'argent ;
- L'intégration de la maquette dans son futur environnement facilite l'évaluation des dimensions du produit ;
- Les environnements virtuels utilisés pour les représentations virtuelles de produits, ne nécessitent pas forcément un haut niveau de réalisme, cela ne nuit pas à la compréhension du concept de produit ;

- L'apparence des avatars peut influencer la stratégie de manipulation d'un prototype virtuel et de l'interface d'interaction, ce qui peut fausser l'évaluation du prototype virtuel ;
- Pour éviter des influences non désirées, il est souhaitable de privilégier des avatars sans indication de direction, tels que des avatars en forme d'étoile ou de sphère ;
- Le prototype virtuel semble ne peut pas pouvoir se substituer au prototype physique, ces deux RI semblent complémentaires. En effet, malgré les avancés réalisées dans le domaine des interfaces de RV, il n'est actuellement pas possible d'égaliser l'évaluation tactile permise par le prototype physique. Cependant, l'utilisation du prototype virtuel en complément du prototype physique permet de diminuer le nombre de prototype physique ;
- Pour l'évaluation visuelle et fonctionnelle d'un concept de produit, il est possible d'utiliser une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle : Le Produit Concept Virtuel (PCV). Le PCV est une représentation virtuelle qui évolue tout au long des phases amonts du processus de conception, en fonction des besoins des concepteurs et des décisions prises après les phases dévaluation. Le PCV est donc une représentation intermédiaire virtuelle ayant plusieurs niveaux de définition, permettant d'évaluer l'esthétique, les fonctionnalités ou les matériaux composants le futur produit.

7 Conclusion et Perspectives

Ce travail de recherche montre l'intérêt de la RV et plus particulièrement des représentations intermédiaires virtuelles en conception de produits. L'utilisation des représentations virtuelles permet un investissement financier moins lourd et une analyse plus détaillée, plus tôt dans le processus de conception. De plus, par leur rapidité de réalisation, les représentations virtuelles permettent d'évaluer un nombre important de déclinaisons du produit, en minimisant le temps de réalisation.

Pour répondre à notre problématique de recherche qui est de savoir si les RI virtuelles sont substituables ou complémentaires aux RI physiques, nous avons comparé l'utilisation de ces deux types de représentations pour l'évaluation de produits.

Les résultats de la première expérimentation nous suggèrent que la maquette virtuelle est substituable à la maquette physique, pour une évaluation visuelle de produits. Les résultats de la seconde expérimentation nous suggèrent que les avatars peuvent influencer la manipulation d'objets virtuels et d'interfaces réelles d'interaction. Ces avatars peuvent ainsi fausser l'évaluation de prototypes virtuels. Dans la troisième expérimentation, les résultats nous laissent penser que le prototype virtuel ne peut pas se substituer au prototype physique. L'évaluation tactile du prototype virtuel n'a pas été concluante, à cause des lacunes de l'interface haptique utilisée. Cependant, nous pensons que le prototype virtuel est complémentaire au prototype physique, il permet de réduire le nombre de prototypes physiques. Enfin, nous proposons une nouvelle représentation intermédiaire virtuelle évolutive, le Produit Concept Virtuel (PCV). Le PCV permet l'évaluation de concepts de produits tout au long des phases amonts du processus de conception. Les concepteurs disposent ainsi d'une représentation intermédiaire virtuelle ayant plusieurs niveaux de définition, selon qu'ils souhaitent évaluer l'esthétique, les fonctionnalités ou les matériaux composant le futur produit. Une étude complémentaire est toutefois nécessaire pour déterminer si le PCV peut remplacer les différentes représentations intermédiaires physiques et virtuelles existantes.

Nos travaux apportent des éléments de réponse concernant l'utilisation des représentations intermédiaires virtuelles, pour l'évaluation de produits. Ils ouvrent par la même occasion de nouvelles pistes de recherche.

La première piste de recherche est l'évaluation tactile de prototypes virtuels à l'aide de différentes interfaces haptiques. Dans la troisième expérimentation, pour évaluer tactilement le prototype virtuel, nous avons utilisé une interface haptique de type bras à retour d'effort. Cette interface ne permet qu'un contact ponctuel avec le prototype virtuel, ce qui est très loin de ce que permet la main humaine. Cependant, il existe d'autres interfaces haptiques telles que le SPIDAR ou le CyberGrasp (Figure N° 95), certaines interfaces permettent même la manipulation à 2 mains co-localisée. Nous pensons qu'il serait intéressant de tester ces interfaces haptiques pour l'évaluation de prototypes virtuels.

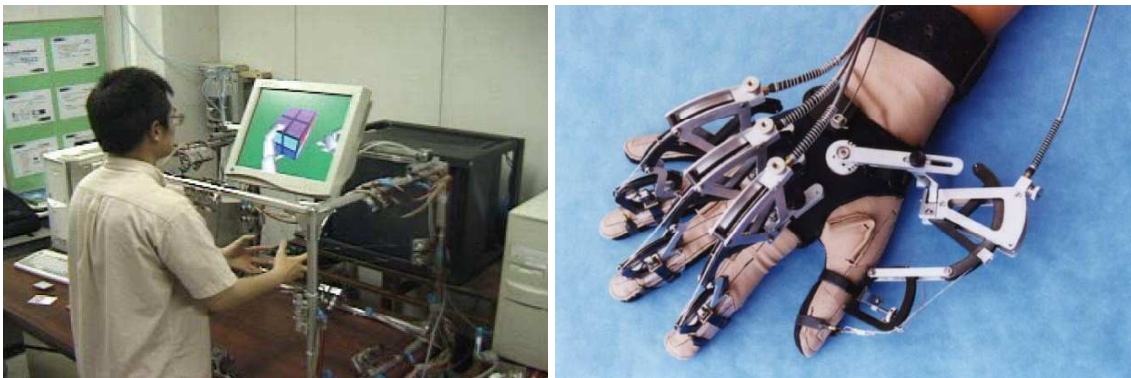


Figure N° 95. Interfaces haptiques

La seconde piste de recherche concerne les futures interfaces haptiques qui seront utilisées pour l'évaluation tactile de produits. La troisième expérimentation a mis en évidence les lacunes de l'interface haptique utilisée. La plupart des interfaces haptiques existantes ont été réalisées pour répondre aux besoins dans différents domaines tels que la téléopération, les simulateurs militaires ou la médecine. Nous pensons donc qu'il serait souhaitable de concevoir de nouvelles interfaces haptiques adaptées aux besoins de la conception de produits et plus particulièrement à l'évaluation tactile de produits. De nouvelles recherches sont donc souhaitables pour mettre au point de nouvelles interfaces, permettant au concepteur de réaliser une évaluation tactile réaliste du produit. L'utilisateur doit pouvoir évaluer virtuellement le futur produit comme il le ferait dans la réalité.

La troisième piste de recherche est l'utilisation des avatars pour optimiser la manipulation des interfaces d'interaction existantes, ayant un espace de travail réduit ou excentré (Figure N° 96). Lors de la seconde expérimentation, nous avons constaté que l'indication de direction suggérée visuellement par les avatars pouvait influencer la manière dont les utilisateurs manipulent l'interface d'interaction. Nous déduisons de ce résultat, qu'il

est probablement possible d'utiliser des avatars ayant une indication visuelle de direction spécifique afin d'influencer l'utilisateur, de manière à ce qu'il reste dans l'espace de travail de l'interface d'interaction et qu'il n'atteigne pas les butées mécaniques de l'interface.

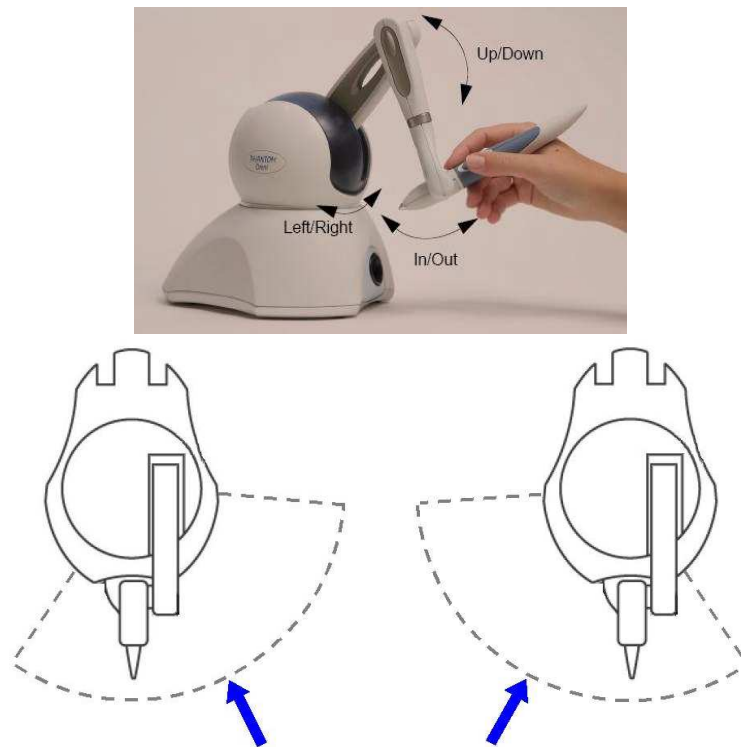


Figure N° 96. Espace de travail réduit et excentré

La quatrième piste de recherche est la conception d'avatars polymorphes, pouvant changer de propriétés visuelles en fonction de l'objet virtuel à manipuler et de la tâche à accomplir. Cela est déjà le cas dans certaines applications de bureautique utilisant des curseurs 2D qui changent de forme, par exemple lorsqu'ils survolent un lien internet. Nous présentons dans la Figure N° 97 un avatar polymorphe, qui change de forme en fonction de sa distance par rapport à l'objet à manipuler. Cet avatar initialement en forme de sphère, se transforme en flèche lorsqu'il entre dans la zone d'influence de l'objet à manipuler, symbolisée par une sphère semi transparente. Lorsqu'il se trouve à l'intérieur de la zone d'influence, l'avatar pointe continuellement le centre de l'objet à manipuler. De cette manière, aucune direction n'est privilégiée et l'utilisateur n'est donc pas influencé dans la réalisation de sa tâche. Dans le cas présent, il n'y a qu'un seul objet à manipuler. Pour la manipulation de plusieurs objets virtuels, il faut envisager une stratégie pour pouvoir pointer des objets séparables mais proches, ayant des zones d'influences communes.

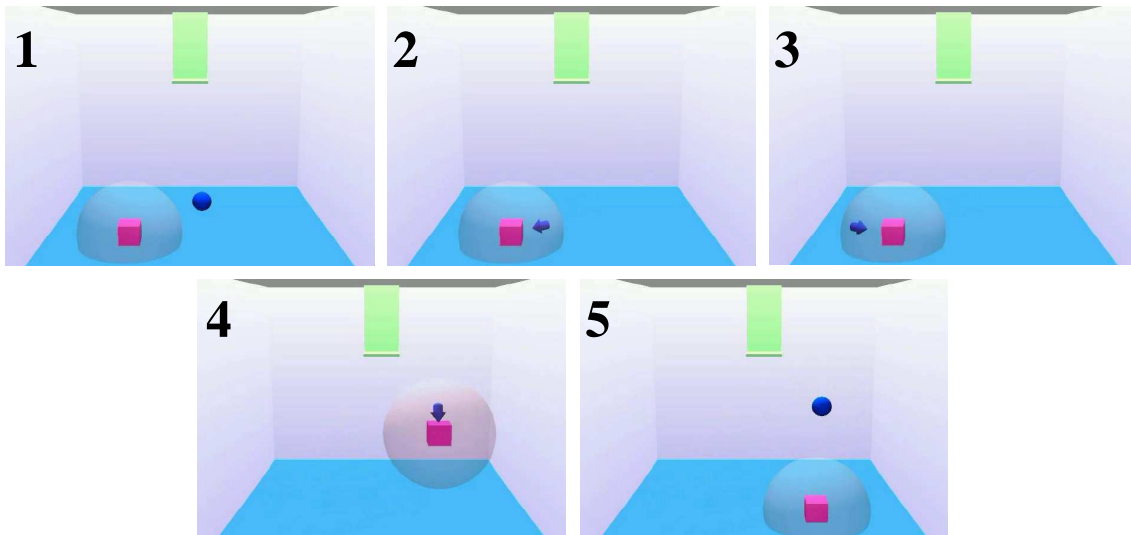


Figure N° 97. Avatar polymorphe

Par ailleurs, Il serait souhaitable de mener d'autres recherches afin de s'assurer qu'il n'y a pas d'autres influences dues au choix de l'avatar. Pour cela, il faut étudier plus d'avatars de formes variées, ainsi que d'autres interfaces d'interaction, avec et sans retour d'effort.

Concernant le Produit Concept Virtuel (PCV), il nous semble utile de l'améliorer à l'aide de travaux qui ont été menés dans d'autres laboratoires de recherches.

- Nous pourrions ainsi améliorer la compréhension du PCV en l'agrémentant d'annotations 3D. Des travaux ont été menés à ce sujet à l'Université Technologique de Compiègne (UTC) par Aubry [8] ;
- Il serait aussi très intéressant de pouvoir créer et modifier le PCV directement en environnement virtuel, évitant ainsi les allers retours entre modèle CAO et modèle virtuel, très coûteux en terme de temps. Des travaux très intéressants ont été menés à ce sujet au Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur de l'Université Paris XI (LIMSI), avec le projet VRAD [46-49]. La possibilité de modifier la représentation virtuelle directement en EV, pourrait grandement contribuer à l'efficacité des revues de projets qui sont actuellement réalisées en environnement immersif ;
- Ensuite, nous considérons qu'il sera à l'avenir indispensable de permettre aux équipes de conception géographiquement distantes, de pouvoir travailler ensemble, à distance, sur le même PCV. Deux projets intéressants ont été menés à ce sujet, le projet SPIN

[66] mené par le Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (LIFL) et ALCOVE, projet commun LIFL, INRIA et IRCICA ;

- Enfin, une étude comparative du PCV et des représentations intermédiaires existantes est nécessaire pour déterminer si le PCV peut complètement se substituer aux représentations intermédiaires existantes pour l'évaluation de produits.

Un travail conséquent reste à mettre en place concernant l'utilisation de la RV en conception de produits. La RV va offrir à l'utilisateur une meilleure compréhension de l'environnement 3D qui va lui permettre de détecter et d'éviter au plus tôt les erreurs de conception et l'aider à fournir un meilleur résultat. Cependant la RV n'a pas la même utilité tout au long du processus de conception. Dans l'étape de définition du concept, la RV peut à ce jour difficilement remplacer les outils traditionnels, comme les plans 2D et les esquisses qui sont plus faciles d'utilisation et plus rapides à mettre en oeuvre. La RV comme moyen de représentation prend plus d'intérêt lors de l'évaluation des concepts ainsi que lors de la communication entre concepteurs. La RV est utilisée comme outil d'aide à la décision. Il serait pourtant intéressant de pouvoir réaliser des esquisses 3D en environnement immersif, possédant les fonctionnalités opératives supportées par l'esquisse sur papier. Ainsi, les concepteurs pourraient concevoir un produit en EV, depuis la première esquisse jusqu'au prototype de pré-production, en utilisant une RI évolutive.

Bibliographie

- [1] 5DT, <http://www.5dt.com>.
- [2] Airbus, www.airbus.com.
- [3] Airbus-Industries, "Supportability Engineering Statement of Needs for Graphic Analysis on Digital Mock-Up", *Rapport Airbus ACE/SE-TN-0002/98*, 1998.
- [4] T. Allen, "Managing the flow of technology", *Boston, M.I.T. Press*, 1982.
- [5] N. Ambady, M. Hallahan, et R. Rosenthal, "On judging and being judged accurately in zero-acquaintance situations", *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 69(3), pp. 518-529, 1995.
- [6] C. Andriot, "Les progrès du prototypage virtuel", *CLEFS CEA-N° 47. CEA centre de Fontenay-aux-roses. France*, 2003.
- [7] A. Aoussat, "La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle", *ENSAM, Paris, Thèse de doctorat*, 1990.
- [8] S. Aubry, "Gestion des connaissances pour les annotations en environnement virtuel", 2005.
- [9] Barco, <http://www.barco.com>.
- [10] K. P. Beier, "Virtual reality-advanced design and manufacturing", *ESD Technol*, 56(1), pp. 22-30, 1995.
- [11] S. Benford, C. Greenhalgh, J. Bowers, D. Snowdon, et L. E. Fahlén, "User embodiment in collaborative virtual environments", *CHI*, pp. 242-249, 1995.
- [12] S. Benford, C. Greenhalgh, T. Rodden, et J. Pycock, "To what extent is cyberspace really a space? Collaborative virtual environments", *ACM*, vol. 4(7), pp. 79-85, 2001.
- [13] S. Ben-Mahmoud-Jouini, "Stratégies d'offres innovantes et processus de conception. Le cas des grandes entreprises générales de Bâtiment françaises", *Conférence Internationale de l'AIMS, Ecole Centrale Paris, Chatenay-Malabry*, pp. 19-20, 1999.
- [14] G. R. Bennett, "The application of virtual prototyping in the development of complex aerospace products", *Aircraft Engng Aerospace Technol*, vol. 69(1), pp. 19-25, 1997.
- [15] M. Beth, "Virtual Tune-Up simulated design and upkeep for a fighterjet engine", *DigitalCAD*, 2002.
- [16] Z. Bien, C. Lee, W. Jang, et J. H. Kim, "Real-Time Sign Language Recognition/Generation for Two-Way Communication", *World Automation Congress*, 1998.
- [17] M. Billinghurst, "Put that where ? voice and gesture at the graphic interface", *Computer Graphics*, 32(4), pp. 60-63, 1998.
- [18] F. Biocca, "The cyborg's dilemma: Progressive embodiment in virtual environments", *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 3(2), 1997.
- [19] J. C. Boquet, *Journée CNRS "Mécanique, génie des matériaux, acoustique" section 09*, 1994.
- [20] B. Bossard, T. Convard, A. Braffort, D. Touraine, P. Bourdot, et M. Jardino, "Un système de reconnaissance de gestes générique pour la Réalité Virtuelle", *RFIA 04, Toulouse, France*, 2004.
- [21] L. Bouguila, M. Ishii, et M. Sato, "Scalable SPIDAR: A Haptic Interface For Human-Scale Virtual Environments", *International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, 2001.
- [22] P. Bourdot, M. Dromigny, et L. Arnal, "Virtual navigation fully controlled by head tracking", *International Scientific Workshop on Virtual Reality and Prototyping. Laval (France)*, 1999.

- [23] P. Bourdot et D. Touraine, "Polyvalent display framework to control virtual navigations by 6DOF tracking", *IEEE VR 02, Orlando, Florida (US)*, 2002.
- [24] D. Bowman, "Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments: Design, Evaluation, and Application", *PhD Thesis, Georgia Institute of Technology*, 1999.
- [25] D. Bowman et L. Hodges, "An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments", *Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1997.
- [26] D. Bowman et L. Hodges, "An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments", *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp. 35-38, 1997.
- [27] D. Bowman et L. Hodges, "Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments", *The Journal of Visual Languages and Computing*, vol. 10, pp. 37-53, 1999.
- [28] D. Bowman, D. Koller, et L. Hodges, "Travel in Immersive Virtual Environments: an Evaluation of Viewpoint Motion Control Techniques", *Virtual Reality Annual Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1997.
- [29] D. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola, et I. Poupyrev, *3D User Interfaces : Theory and Practice*, 2004.
- [30] D. Bowman et C. Wingrave, "Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments", *IEEE VR*, 2001.
- [31] M. Bricken, "Virtual Worlds: No interface to design", *Benedikt, Michael (Ed.). Cyberspace: First Step. MIT Press, Cambridge*, pp. 363-382, 1991.
- [32] S. Bryson, "Virtual Reality in Scientific Visualization", *ACM*, Vol. 39, No. 5, pp. 62-71, 1996.
- [33] H. J. Bullinger, R. Breining, et W. Bauer, "Virtual Prototyping - State of the Art in Product Design", *26th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 1999.
- [34] G. Burdea et P. Coiffet, "Virtual Reality Technology", *John Wiley & Sons, New York, USA*, 1994.
- [35] J. Buur et M. M. Andreasen, "Design models in mechatronic product development", *Design Studies*, Vol. 10, pp. 155-162, 1989.
- [36] M. W. Buxton, "Extending Fitt's law to two-dimensional tasks", *Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1992.
- [37] C. Cadoz, "Les réalités virtuelles", *Dominos-Flammarion*, 1994.
- [38] J. S. Casanueva et E. H. Blake, "Presence and Co-Presence in Collaborative Virtual Environments", *Master's thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa*, 2000.
- [39] J. S. Casanueva et E. H. Blake, "The Effects of Avatars on Co-presence in a Collaborative Virtual Environment", *Technical Report CS01-02-00, Department of Computer Science, University of Cape Town, South Africa*, 2001.
- [40] Caterpillar, "Collaborative Virtual Reality", *Directors of Research meeting, NCSA*, 1997.
- [41] P. Chedmail, B. Maille, et E. Ramstein, "Etat de l'art sur l'accessibilité en réalité virtuelle, application à l'étude de l'ergonomie", *Colloque Pimeca, La Plagne, 2-5 avril*, 2001.
- [42] P. Christiansson, "Capture of User Requirements and Structuring of Collaborative VR environments", *Conference on Applied Virtual Reality in Engineering & Construction Applications of Virtual Reality. O. Tullberg, N. Dawood, M. Connell (Eds.)*, 2001.

- [43] H. Christofol, "Modélisation systémique du processus de conception de la coloration d'un produit", *ENSAM Paris, Thèse de doctorat*, 1995.
- [44] C. K. Chua, K. F. Leong, et C. S. Lim, "Rapid prototyping: principles and applications", *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore*, 2003.
- [45] G. Colombo, F. D. Angelis, et L. Formentini, "An approach to evaluate the ergonomics of boards of control", *Virtual Concept*, 2005.
- [46] T. Convard, "Conception assistée par ordinateur en environnement immersif", *Université Paris XI, Thèse de doctorat*, 2005.
- [47] T. Convard et P. Bourdot, "History-based reactive objects for immersive CAD", *ACM Solid Modeling (SM'04), Genova, Italy*, 2004.
- [48] T. Convard et P. Bourdot, "A multimodal immersive solid modeler with reactive objects", *International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 05), Las Vegas, USA*, 2005.
- [49] T. Convard et P. Bourdot, "Objets réactifs pour la CAO - Application à la conception de formes avec interaction multimodale et environnement virtuel", *Revue Internationale d'Ingénierie Numérique, Hermes-Lavoisier éditeur*, 2005.
- [50] S. Coquillart, J. Grosjean, et A. Paljic, "Interaction 3D, paradigmes et métaphores", *Le Traité de la Réalité Virtuelle. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 2003.
- [51] C. Cruz-Neira, "Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE", *ACM Computer Graphics*, 27(2), pp. 135-142, 1993.
- [52] F. Dai, "Virtual Reality for Industrial Applications", *Berlin, Springer*, 1998.
- [53] F. Dai et M. Göbel, "Virtual Prototyping - An Approach Using VR-Techniques", *Computers in Engineering - 1994, Vol. 1, ASME*, 1994.
- [54] R. P. Darken et J. P. Sibert, "A toolset for navigation in virtual environments", *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 157-165, 1993.
- [55] R. P. Darken et J. P. Sibert, "Waynding strategies and behaviors in large virtual worlds", *ACM SIGCHI*, 1996.
- [56] Dassault-Systèmes, www.3ds.com.
- [57] A. Delamarre, "Contribution du "produit concept" à l'organisation des phases préliminaires du processus de conception en PME : Application chez ROSSIGNOL S.A. dans le cadre de la mise en place d'une cellule d'innovation", *Thèse de doctorat, Université d'Angers*, 2006.
- [58] A. Delamarre, A. Kadri, H. Christofol, et S. Richir, "'Concept product" Design Process : Assessment and Performance Evaluation for Early Design Phases", *Proceedings of International conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME), Grenoble*, 2006.
- [59] C. Deshayes, "La médiation de l'esquisse à main levée et de l'esquisse numérique dans le processus de conception", *SCAN'05, Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, 2005.
- [60] K. Dion, E. Berscheid, et E. Walster, "What is beautiful is good", *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 24(3), pp. 285-290, 1972.
- [61] S. DiPaola et D. Collins, "A 3D Virtual Environment for Social Telepresence", *Western Computer Graphics Symposium, Skigraph-02, Silverstar, BC, Canada*, 2002.
- [62] L. Dominjon, A. Lécuyer, J. M. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, et S. Richir, "The "Bubble" Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace", *World Haptics Conference, Pisa, Italy*, 2005.
- [63] L. Dominjon, A. Lécuyer, J. M. Burkhardt, et S. Richir, "Haptic Hybrid Rotations: Overcoming Hardware Rotational Limitations of Force-Feedback Devices", *IEEE International Conference on Virtual Reality (IEEE VR), Washington, US*, 2006.

- [64] T. Dorta, "L'influence de la réalité virtuelle non-immersive comme outil de visualisation sur le processus de design", *Thèse de doctorat à l'Université de Montréal*, 2001.
- [65] N. Ducheneaut et R. J. Moore, "Let me get my alt: digital identiti(es) in multiplayer games", *CSCW Workshop on Representation of Digital Identities*. Chicago IL, 2004.
- [66] C. Dumas, "Un modèle d'interaction 3D : Interactions homme-machine et homme-machine-homme dans les interfaces 3D pour le TCAO synchrone", *Université des Sciences et Technologies de Lille, Thèse de doctorat*, 1999.
- [67] G. Dumont, "Mécanique Prototypage virtuel et Réalité virtuelle", *Présentation DIT ENS Cachan*, 2005.
- [68] EDF, www.edf.com.
- [69] C. Ellis, "A Conceptual Model of Groupware", *ACM Conference on Computer Supported Collaborative Work*, 1994.
- [70] Elumens, <http://www.elumens.com>.
- [71] Endrea, "Nomenclature, ENDREA", *The Swedish Engineering Design Research and Education Agenda*, 2001.
- [72] Fastrak, http://www.polhemus.com/?page=Motion_Fastrak, 2007.
- [73] S. Feiner, B. MacIntyre, M. Haupt, et E. Solomon, "Windows on the world : 2d windows for 3d augmented reality", *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 145-155, 93.
- [74] A. Forsberg, K. Herndon, et R. Zeleznik, "Aperture based selection for immersive virtual environments", *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 95-96, 1996.
- [75] S. E. Frees et G. D. Kessler, "Precise and Rapid Interaction through Scaled Manipulation in Immersive Virtual Environments", *IEEE VR*, 2005.
- [76] P. Fuchs, "Le Traité de la Réalité Virtuelle", *Les Presses de l'Ecole des Mines*, 2004.
- [77] A. B. Garcia, R. P. Gocke, et N. P. Johnson, "Virtual prototyping: Concept to production", *Technical Report DSMC 1992-93, Defense Systems Management College, Fort Belvoir, VA 22060-5565*, 1994.
- [78] A. B. Garcia, R. P. Gocke, et N. P. Johnson., "Virtual Prototyping, Concept to Production", *Defense System Management College, Ft. Belvoir, VA.*, 1993.
- [79] M. L. Goel, "Religious tolerance and Hinduism", *Conference at the Florida Atlantic University*, 2002.
- [80] P. S. Goel et N. Singh, "Creativity Innovation in Durable Product Development", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 35, nos. 1-2, pp. 5-8, 1998.
- [81] G. Gogu, "Méthodologie d'innovation : la résolution des problèmes créatifs", *Université d'Automne PRIMECA, Nancy*, 1999.
- [82] F. Gosselin, "Etat de l'Art des Organes de Commande pour la Réalité Virtuelle", *CEA/LIST, Technical report*, 2001.
- [83] J. Grosjean, "Environnements Virtuels : Contrôle d'Application et Exploration de Scènes 3D", *PhD Thesis, Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines*, 2003.
- [84] J. Grosjean et S. Coquillart, "Command & control cube : a shortcut paradigm for virtual environments", *IPT-EGVE*, 2001.
- [85] M. Gross et E. Do, "Ambiguous Intentions: A paper-like interface for creative design", *UIST, ACM. Seattle*, pp. 183-192, 1996.
- [86] Habitat, *Lucasfilm Games*, 1987.
- [87] C. Hand, "Survey of 3-D Interaction Techniques", *Computer Graphics Forum*, vol. 16, pp. 269-281, 1997.
- [88] Haption, <http://www.haption.com>.

- [89] Histoire-Informatique, http://www.histoire-informatique.org/grandes_dates/2_3.html, 2007.
- [90] Immersion, <http://www.immersion.com>.
- [91] J. Isdale, "What is virtual reality?" *a homebrew introduction and information resource list*, 1993.
- [92] K. M. Jää-Aro, "Reconsidering the avatar: From user mirror to interaction locus", *Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden*, 2004.
- [93] R. Jacoby, J. Humphries, et M. Ferneau, "Gestural interaction in a virtual environment", *Stereoscopic Display and Virtual Reality Systems*, pp. 17-22, 1994.
- [94] S. Jayaram, H. I. Connacher, et K. W. Lyons, "Virtual assembly using virtual reality techniques", *Comput Aided Design*, vol. 29(8), pp. 575-84, 1997.
- [95] S. Johansen, "Avatars in Global E-Commerce: A Cross-Cultural Analysis of the Effects of Avatars on Online Consumer Behavior in Germany and the U.S", *Journal of Undergraduate Research*, vol. 6, 2005.
- [96] P. Johansson, "Digital Product Representations-Visualised for Product Design", *Licentiate thesis, University of Linköping, Sweden*, 2001.
- [97] A. Kadri, H. Christofol, et H. Samier, "Application de la Réalité Virtuelle pour l'Évaluation Collaborative de Produits Concept : Collecteurs de déchets virtuels", *Colloque CONFERE, Nantes*, pp. 1-12, 2004.
- [98] A. Kadri, H. Christofol, et H. Samier, "Virtual Reality Application for Collaborative Design Evaluation : Virtual Dustbin Design", *Proceedings of International Conference on Virtual Reality (VRIC), Laval*, pp. 119-127, 2004.
- [99] A. Kadri, A. Delamarre, H. Christofol, et S. Richir, "Contribution de la Réalité Virtuelle à l'évaluation de produit concept en PME: le cas ROSSIGNOL S.A." *Colloque de l'Institut de la Production et des organisations Industrielles (IPI), Allevard*, 2006.
- [100] A. Kadri, A. Delamarre, H. Christofol, et S. Richir, "Le Produit Concept Virtuel pour l'Évaluation de Produit : Le Cas ROSSIGNOL S.A." *18e Congrès Français de Mécanique (CFM), Grenoble.*, 2007.
- [101] A. Kadri, A. Lécuyer, J. M. Burkhardt, et S. Richir, "The Influence of Visual Appearance of User's Avatar on the Manipulation of Objects in Virtual Environments", *Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality (IEEE VR), Charlotte, North Carolina, USA*, 2007.
- [102] A. Kadri, A. Lécuyer, J. M. Burkhardt, et S. Richir, "Visual Appearance of User's Avatar Can Influence the 3D Manipulation of Both Real Devices and Virtual Objects", *Proceedings of IEEE International Symposium on 3D User Interfaces (IEEE 3DUI), Charlotte, North Carolina, USA*, 2007.
- [103] H. Y. Kan, V. G. Duffy, et C. J. Su, "An Internet virtual reality collaborative environment for effective product design", *Comput Ind*, 45(2), pp. 197-213, 2002.
- [104] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, et K. Tachibana, "Virtual object manipulation on a table-top AR environment", *International Symposium on Augmented Reality*, 2000.
- [105] M. Kerttula, "Virtual Design and Virtual Reality Prototyping. New Product Development based on Virtual Reality Prototyping", *Metalliteollisuuden Kustannus Oy, Helsinki, Finland*, pp. 24-33, 1999.
- [106] T. Koda, "Agents with faces: The effects of personification", *HCI, London*, 1996.
- [107] R. Komerska et C. Ware, "A Study of Haptic Linear and Pie Menus in a 3D Fish Tank VR Environment", *Haptic Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2004.

- [108] M. Krueger, "Artificial Reality", *Addison-Wesley*, 1991.
- [109] M. Krueger, "Artificial reality", *Addison Wesley, second edition. ISBN 0-201-52260-8*, 1991.
- [110] J. J. LaViola, "A survey of hand postures and gesture recognition", *Technical Report CS-99-11, Brown University Providence*, 1999.
- [111] E. Layton, "American Ideologies of Science and Engineering", *Technology and Culture, Vol. 17, No. 4*, pp. 688-701, 1976.
- [112] J. C. Lebahar, "Le dessin d'architecte, simulation graphique et réduction d'incertitude", *Editions Parenthèse, coll. architecture/outils*, 1983.
- [113] R. Leblond, "Utilisation des maquettes physiques : Cas de la maquette physique du tronçon 15/21 de l'A340 réalisé à Saint-Nazaire", *Rapport EADS DCR/I/04384-94*, 1994.
- [114] K. C. Lee et N. Chung, "A web DSS approach to building an intelligent internet shopping mall by integrating virtual reality and avatar", *Expert Systems with Applications*, vol. 28 (2), pp. 333-346, 2005.
- [115] S. Lee et J. Badler, "Eyes Alive", *ACM SIGGRAPH, San Antonio*, pp. 637-644, 2002.
- [116] J. Legardeur, C. Merlo, et G. Pol, "Instrumenter l'informel dans les phases amont des projets de conception innovante", *Revue Document numérique, Coopération et organisation numériques, Editions Hermès-Lavoisier*, 2004.
- [117] V. Lehner et T. DeFanti, "Distributed Virtual Reality: Supporting Remote Collaboration in Vehicle Design", *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(2), pp. 13-17, 1997.
- [118] W. H. Leung et T. Chen, "Immersive interactive technologies towards a multi-user 3D virtual environment", *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001.
- [119] W. H. Leung et T. Chen, "A Multi-User 3-D Virtual Environment with Interactive Collaboration and Shared Whiteboard Technologies", *Journal of Multimedia Tools and Applications*, vol. 20, pp. 7-23, 2003.
- [120] J. Liang, "JDCAD : A highly interactive 3d modeling system", *Computers and Graphics*, 18(4), pp. 499-506, 1994.
- [121] Logitech, <http://rvirtual.free.fr/interfaces/motrice/traqueur.htm>, 2007.
- [122] J. S. Lombardo, E. Mihalak, et S. R. Osborne, "Collaborative Virtual Prototyping", *Johns Hopkins APL Technical Digest, volume 17, number 3*, 1996.
- [123] B. Longueville, "Capitalisation des processus de décision dans les projets d'innovation: Application à l'automobile", *Thèse de doctorat à l'Ecole Centrale de Paris*, 2003.
- [124] C. Luciano et P. Banerjee, "Avatar kinematics modeling for telecollaborative virtual environments", *Conference on Winter Simulation, Orlando, Florida. Society for Computer Simulation International, San Diego*, pp. 1533-1538, 2000.
- [125] J. D. Mackinlay, K. S. Card, et G. G. Robertson, "Rapid controlled movement through a virtual 3d workspace", *Computer Graphics*, 24(4), pp. 171-176, 1990.
- [126] M. Mine, "Virtual Environment Interaction Techniques", *University of North Carolina TR95-018*, 1995.
- [127] M. Mine, "Working in a Virtual World: Interaction Techniques Used in the Chapel Hill Immersive Modeling Program", *University of North Carolina, Technical Report TR96-029*, 1996.
- [128] M. R. Mine, "Virtual environment interaction techniques", *Technical Report TR95018, UNC Chapel Hill Computer Science*, 1995.

- [129] J. Mortensen, V. Vinayamoorthy, M. Slater, A. Steed, B. Lok, et M. C. Whitton, "Collaboration in Tele-Immersive Environments", *Eurographics Workshop on Virtual Environments. Barcelona, Spain*, 2002.
- [130] MortonHeilig, <http://www.mortonheilig.com/>, 2007.
- [131] D. Nahon, "Salles Immersives et Cubes de Réalité Virtuelle, une Première Mondiale sur PC : le SAS Cube", *Imagina*, 2002.
- [132] A. Nahvi, D. D. Nelson, J. M. Hollerbach, et D. E. Johnson, "Haptic Manipulation of Virtual Mechanisms from Mechanical CAD Designs", *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 375-380, 1998.
- [133] F. Neelamkavil, "Computer Simulation and Modelling", *Chichester, Wiley*, 1987.
- [134] NFX50-105, "Le management de projet, concepts", 1991.
- [135] I. Nonaka, "Redundant, Overlapping Organization : A Japanese Approach to Managing the Innovation Process", *California Management Review*, 1990.
- [136] K. Nowak et C. Rauh, "The influence of the avatar on online perceptions of anthropomorphism, androgyny, credibility, homophily, and attraction", *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 11(1), 2005.
- [137] OCDE, "Principes directeurs proposés pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation technologique", *Manuel d'Oslo, Paris. 142 pages*, 1997.
- [138] R. Ohanian, "The impact of celebrity spokespersons' perceived image on consumers' intention of purchase", *Advertising Research*, vol. 31, pp. 46-54, 1991.
- [139] C. E. Osgood, G. J. Suci, et P. H. Tannenbaum, "The measurement of meaning", *Illinois press*, 1957.
- [140] D. Paillot, "Gestion de données pour la visualisation de maquettes numériques en environnement virtuel immersif. Application au design automobile", *ENSAM Cluny, Thèse de doctorat*, 2004.
- [141] H. Park, "Digital and Manual Media in Design", *Education and Practice, European Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe*, pp. 325-334, 1996.
- [142] Patrimoine-Polytechnique, <http://www.patrimoine.polytechnique.fr/collectionhomme/BioWheatstone.html>, 2006.
- [143] D. Perraya, "Internet, un nouveau dispositif de médiation des savoirs et des comportements ?" <http://tecfa.unige.ch/tecfa/teaching/>, 1999.
- [144] J. Perrin, "Concevoir l'innovation industrielle", *CNRS éditions Paris*, 2001.
- [145] P. Persson, "Exms: An animated and avatar-based messaging system for expressive peer communication", *ACM*, pp. 31-39, 2003.
- [146] J. G. Phillips, J. W. Meehan, et T. J. Triggs, "Effects of cursor orientation and required precision on positioning movements on computer screens", *International Journal of HCI*, vol. 15(3), Lawrence Erlbaum, pp. 379-389, 2003.
- [147] J. Pierce, A. Forsberg, M. Conway, S. Hong, et R. Zeleznik, "Image plane interaction techniques in 3D immersive environments", *Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1997.
- [148] K. Pimentel et K. Teixeira, "La réalité virtuelle... de l'autre côté du miroir", *Paris : Addison-Wesley France*, 1993.
- [149] A. Po, D. Fisher, et S. Booth, "Comparing cursor orientations for mouse, pointer, and pen interaction", *CHI*, pp. 291-300, 2005.
- [150] T. Porter, "How architects visualize", *Van Nostrand Reinhold, New York*, 1979.
- [151] I. Popyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, et T. Ichikawa, "Go-go interaction technique : Non-linear mapping for direct manipulation in vr", *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 79-80, 1996.

- [152] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghurst, et T. Ichikawa, "A framework and testbed for studying manipulation techniques fo immersive vr", *Virtual Reality Software and Technology*, pp. 21-28, 1997.
- [153] R. Prada, M. Vala, K. Höök, et A. Bullock, "FantasyA - The Duel of Emotions", *Conference on Intelligent Virtual Agents, Kloster Irsee, Germany*, 2003.
- [154] H. Prendinger, J. Mori, et M. Ishizuka, "Using human physiology to evaluate subtle expressivity of a virtual quizmaster in a mathematical game", *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, vol. 62(2), pp. 231-245, 2005.
- [155] PSA-Peugeot-Citroën, www.psa-peugeot-citroen.com.
- [156] Renault, www.renault.com.
- [157] S. Richir, "Les technologies de la réalité virtuelle pour la conception de produits", *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Angers*, 2003.
- [158] G. Robertson, S. Card, et J. Mackinlay, "Non immersive virtual reality", *Ronalds, Williams. (Ed.) IEEE Computer (2)*, pp. 79-83, 1993.
- [159] W. Robinett et R. Holloway, "Implementation of flying, scaling, and grabbing in virtual worlds", *Computer Graphics*, vol. 25(2), pp. 189-192, 1992.
- [160] W. Robinett et R. Holloway, "Implementation of ying, scaling, and grabbing in virtual worlds", *Computer Graphics (Symposium on Interactive 3D Graphics)*, 25(2), pp. 189-192, 1992.
- [161] B. Rooks, "A shorter product development time with digital mock-up", *Assembly Automat*, vol. 18(1), pp. 34-8, 1998.
- [162] B. Salem et N. Earle, "Designing a Non-Verbal Language for Expressive Avatars", *CVE*, pp. 93-101, 2000.
- [163] T. Salomone, "What every engineer should know about Concurrent Engineering", *Marcel Dekker, New York*, 1995.
- [164] Sarcos, <http://www.sarcos.com>.
- [165] M. Sato, "Evolution of SPIDAR", *Virtual Reality International Conference (VRIC), Laval*, 2001.
- [166] M. Sato, "Development of String-Based Force Display", *International Conference on Virtual Reality and Multimedia, Gyeongju, Korea*, 2002.
- [167] J. J. C. Schaaf et F. L. Thompson, "System concept development with virtual prototyping", *conference on Winter Simulation, Atlanta, Georgia, United States*, pp. 941 - 947, 1997.
- [168] J. Schumpeter, "The Theory of Economic Development", *Harvard University Press, Cambridge*, 1934.
- [169] E. Schweikardt et M. D. Gross, "Digital clay: deriving digital models from freehand sketches", *Automation in Construction. Vol 9*, pp. 107-115, 2000.
- [170] U. Sellgren et R. Drogou, "A system and process approach to behavior modeling in mechanical engineering", *Royal Institute of Technology - KTH, Stockholm*, 1998.
- [171] SensAble, *Technologies Incorporated*, <http://www.sensable.com>.
- [172] SensAble, <http://www.sensable.com>.
- [173] H. Seo, C. Joslin, U. Berner, N. Magnenat-Thalmann, M. Jovovic, J. Esmerado, D. Thalmann, et I. Palmer, "VPARK a Windows NT Software platform for a Virtual networked Amusement Park", *Computer Graphics International, Geneva, Switzerland*, pp. 309-315, 2000.
- [174] SGI, *Silicon Graphics Inc.*, <http://www.sgi.com>.
- [175] Shadowrun, *FASA Corporation, Fantasy Productions*, 1989.
- [176] C. Shaw et M. Green, "THRED: A Two-Handed Design System", *ACM Multimedia Systems*, 5(2), 1997.

- [177] W. Sherman et A. Craig, "Working with Virtual Reality", *Morgan Kaufmann*, ISBN 1-55860-353-0, 1997.
- [178] N. Shyamsundar et R. Gadh, "Collaborative virtual prototyping of product assemblies over the Internet", *Computer-Aided Design*, 34(10), pp. 755-768, 2002.
- [179] Z. Siddique et D. W. Rosen, "A virtual prototyping approach to product disassembly reasoning", *Comput Aided Design*, vol. 29(12), pp. 847-60, 1997.
- [180] M. Slater, J. Howell, A. Steed, D. P. Pertaub, M. Garau, et S. Springel, "Acting in Virtual Reality", *ACM Collaborative Virtual Environments*, San Francisco, pp. 103-110, 2000.
- [181] M. Slater, D. P. Pertaub, et A. Steed, "Public Speaking in Virtual Reality: Facing an Audience of Avatars", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 19(2), 1999.
- [182] M. Söderman, "Product Representations: Understanding the product in the Design Process", *Licentiate Thesis*, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1998.
- [183] N. Stephenson, "Snow Crash", *Bantam Books*, 1992.
- [184] R. Stoakley, M. J. Conway, et R. Pausch, "Virtual reality on a wim : Interactive worlds in miniature", *Conference on Human factors in computing systems*, pp. 265-272, 1995.
- [185] J. P. Suller, "Cyberspace as Dream World: Illusion and Reality at the "Palace"", <http://www.rider.edu/%7Esuler/psycyber/cybdream.html>, 1999.
- [186] I. Sutherland, "The ultimate display", *IFIP Congress*, pp. 506-508, 1965.
- [187] T. L. Taylor, "The Social Life of Avatars; Presence and Interaction in Shared Virtual Environments", *Living digitally: Embodiment in virtual worlds*, R. Schroeder (Ed.), pp. 40-62, 2002.
- [188] L. Temri, "Les processus d'innovation : une approche par la complexité", *Conférence Internationale de l'AIMS, Montpellier. Faculté d'Administration et Gestion. Université Montpellier*, 2000.
- [189] S. Tichkiewitch, "Relecture de l'estampage à la lumière de la mécanique", . *Connaissances et savoir-faire en entreprise*, Hermes, 1997.
- [190] S. Tichkiewitch et E. Chapa, "Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée", *PRIMECA*, Nancy, 1995.
- [191] P. Törlind, "Product Models and Environment for Distributed Engineering", *Licentiate Thesis*, Luleå University of Technology, 1999.
- [192] T. Tuikka, "Towards computational instruments for collaborating product concept designers", *University of Oulu, Academic Dissertation*, 2002.
- [193] K. T. Ulrich et S. D. Eppinger, "Product Design and Development", *McGraw-Hill Inc.*, New York, 2000.
- [194] UltimaIV, "Origin Systems, Inc", 1985.
- [195] G. Vélez, "Realidad Virtual en Arquitectura - Actualidad y Futuro", *Congreso Iberoamericano de Gráfico Digital SIGRADI*, Montevideo, pp. 79-82, 1999.
- [196] J. Vince, "Virtual Reality Systems", *Wokingham Addison-Wesley*, 1995.
- [197] J. Vince, "Essential Virtual Reality Fast", *Springer-Verlag*, London, UK, 1998.
- [198] VSR-Lab, <http://www.digital-humans.org/mocap.htm>, 2007.
- [199] C. Ware et S. Osborne, "Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments", *Computer Graphics*, 24(2), pp. 175-183, 1990.
- [200] S. Wesarg, B. Schwald, H. Seibert, P. Zogal, M. Schnaider, et G. Sakas, "MEDARPA - An augmented reality system for supporting minimally invasive interventions", *Eurographics*. <http://www.medarpa.de>, 2005.
- [201] G. Wesche et M. Droske, "Conceptual free-form styling on the responsive workbench", *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2000.
- [202] Wikipedia, <http://fr.wikipedia.org>, 2006.

- [203] P. H. Won, "The comparison between visual thinking using computer and conventional media in the concept generation stages of design", *Automation in Construction*, pp. 319-325, 2001.
- [204] X-IST, <http://www.x-ist.de>, 2007.
- [205] B. Yannou, "Préconception de Produits", *Mémoire d'HDR Ecole centrale Paris*, 2001.
- [206] N. Yee, "The Psychology of MMORPGs: Emotional Investment, Motivations, Relationship Formation, and Problematic Usage", *Avatars at Work and Play: Collaboration and Interaction in Shared Virtual Environments*, R. Schroeder & A. Axelsson (Eds.), 2006.
- [207] S. Yerrapathruni, "Using 4D CAD and immersive virtual environments to improve construction planning", *M.S. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA*, 2003.
- [208] R. Zeleznik, K. Herndon, et J. Hugues, "SKETCH: An interface for sketching 3D scenes", *Computer Graphics, ACM*, 1996.
- [209] D. Zeltzer, "Autonomy, interaction, presence", *Presence, Vol. 1, No. 1*, pp. 127-132, 1992.

Glossaire des abréviations

ACP : Analyse en Composante Principale

ALC : Aide Logicielle Comportementale

ANOVA : Analyse de la Variance

C3 : Command & Control Cube

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CRITT : Centre Régional pour l'Innovation et le Transfert de Technologie

DR : Déviation Relative

ENIAC : Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer

EV : Environnement Virtuel

EVC : Environnement Virtuel Collaboratif

HMD : Head-Mounted Display (Visiocasque)

I³ : Immersion, Interaction et Imagination

LPCMV : Laboratoire de Perception et Contrôle du Mouvement en environnement Virtuel

MANOVA : Analyse Multivariable de la Variance

MN : Maquette Numérique

MP : Maquette Physique

MV : Maquette Virtuelle

NASA : National Aeronautics and Space Administration

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique

PCV : Produit Concept Virtuel

PME : Petite ou Moyenne Entreprise

PP : Prototype Physique

PV : Prototype Virtuel

RA : Réalité Augmentée

RI : Représentation Intermédiaire

RV : Réalité Virtuelle

SDM : Semantic Differential Method

SPIDAR : Space Interface Device for Artificial Reality

TI : Technique d'Interaction

WIMP : Windows, Icons, Menus, Pointers

Annexes

Annexe N°1. Le Sensorama, Morton HEILIG 1962



"... C'est donc à la base un théâtre à une place. On s'assied sur un siège, on glisse la tête dans l'habitacle et on regarde par deux optiques qui restituent une vision périphérique. Le siège est équipé d'un système vibratoire, la plate forme dessous est montée sur caoutchouc, un ventilateur, un dispositif pour les odeurs... le tout synchronisé avec l'image. Le tout est mécanique, les ordinateurs n'existaient quasiment pas quand je l'ai conçu... J'avais quatre films différents : une scène de séduction avec un danseur, une ballade en voiture, un voyage en hélico et une course à moto à travers New York - le siège vibrait avec la moto, on sentait les odeurs, le vent sur le visage...Central Park avec l'odeur d'herbe fraîchement coupée, le Brooklyn Bridge, Times square et ses pizzas, la 5^{ème} avenue,on avait la sensation physique d'être sur la moto et de pencher dans les virages... mais quelques éléments manquaient. D'abord l'effet environnemental était limité à 100°, j'aurais souhaité 180° mais c'était trop cher. Il n'y avait pas de variation de température, et je n'ai pas non plus inclus l'effet d'inclinaison du corps quand on prend un virage, j'avais peur qu'en public ce soit dangereux. Les gens m'appellent le père de la RV, comme Myron Kruger, mais je suis plutôt le grand-père. Pour être tout à fait franc, mon travail n'intègre pas la capacité du spectateur à contrôler l'environnement, à interagir avec lui; ...".

Annexe N°2. Méthodes statistiques

2.1 ANOVA

2.1.1 Description de la méthode

La méthode d'analyse statistique ANOVA (Analysis Of Variance) est une méthode pratique de séparation des effets de multiples facteurs dans un ensemble de données. Cette méthode examine quel facteur a un effet significatif sur une variable dépendante, en comparant la variance à l'intérieur d'un facteur à la variance entre les facteurs.

La méthode ANOVA permet de calculer deux paramètres statistiques importants pour chacun des facteurs: la valeur **F**, et sa valeur associée **p**. Dans un ensemble de résultats, **F** est une mesure de la variation causée par un facteur expérimental particulier, quand tous les autres facteurs ont été pris en compte. Nous pouvons nous la représenter comme une estimation du poids d'un facteur sur l'évolution d'une variable dépendante. Ainsi, plus **F** est élevée, plus l'effet du facteur associé est significatif. La valeur de **F** est obtenue en faisant le rapport des valeurs de **MS effect** et de **MS error** comme l'indique l'équation suivante:

$$F = \frac{\text{MS Effect}}{\text{MS Error}}$$

"**MS effect**" est la variance calculée pour une variabilité entre les groupes de données, "**MS error**" est la variance calculée pour une variabilité à l'intérieur d'un groupe. La variance étant calculée comme la somme des carrés des écarts à la valeur moyenne, divisée par le nombre de valeurs moins un.

La variable **p** donne la probabilité associée à une valeur **F** correspondante. Autrement dit, **p** représente la probabilité pour que la variation des résultats associés à un facteur donné soit due au hasard. Par exemple, une valeur de **p** de 0.1 signifie qu'il y a une chance sur 10 pour que l'effet observé soit dû à une variation aléatoire des résultats. Les résultats seront d'autant plus sûrs que la valeur de **p** est faible. Il est généralement reconnu qu'un effet est significatif si **p** a une valeur inférieure ou égale à 0.05 ($p \leq 5\%$). Ce seuil est accepté comme critère de signification en psychologie de la perception. Ceci est signalé dans les tables **STAT GENERAL ANOVA** par une astérisque portée sur la probabilité.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

La variable "**df Effect**" est le nombre de degrés de liberté (ddl) entre les groupes de données: il est égal au nombre de valeurs des variables moins un.

$$\text{dfEffect} = n - 1$$

La variable "**df Error**" est le nombre de degrés de liberté (ddl) à l'intérieur d'un groupe de N sujets.

$$\text{dfError} = (n - 1) \times (N - 1)$$

La terminologie "effect/error" vient du fait que l'on ne peut pas vraiment décrire une variabilité à l'intérieur d'un groupe de données, c'est une erreur de variance (Error), alors que l'on peut par la différence des moyennes entre groupes montrer les effets significatifs entre facteurs (Effect).

$$t = \frac{(\text{moyenne du groupe 1} - \text{moyenne du groupe 2})}{\sqrt{\frac{\text{variance du groupe 1}}{\text{taille du groupe 1}} + \frac{\text{variance du groupe 2}}{\text{taille du groupe 2}}}} = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}}$$

2.1.2 Les effets croisés

Les facteurs simples, qui ont une importance significative sur les variables, sont appelés *facteurs principaux*. En addition aux effets principaux, ANOVA peut étudier aussi les *interactions d'ordre plus élevé* entre les facteurs. Ces interactions, appelées *effets croisés*, sont des facteurs dont les effets dépendent de l'état d'un ou plusieurs facteurs additionnels. Une fois qu'ANOVA a déterminé les facteurs significatifs sur une variable dépendante, une technique inférentielle est utilisée pour déterminer la direction des effets. Pour les tests relatifs à l'interaction visuelle par exemple, la direction de ces effets sera la variation du temps de saisie, la variation de la distance de suivi etc....

Le **t-test** permet de comparer deux à deux plusieurs valeurs moyennes. C'est la méthode inférentielle la plus simple. Elle compare les valeurs moyennes pour des tests avec et sans facteur particulier. Le signe de la valeur **t-test** dit si le facteur a un effet significatif

(positif) ou non (négatif). Le **t-test** produit également une valeur de probabilité notée (**p-level**) associée qui indique la différence de fiabilité entre les moyennes. Cette probabilité diffèrera de la valeur **p** associée à **F**, de par le nombre d'observations indépendantes, ou degré de liberté qui interviennent dans le calcul des **t-tests** et des **F**. En général, la statistique **F** est la mesure la plus puissante et la plus fiable d'un effet. Notons qu'il y a deux tests possibles: le **test de Scheffe**, qui est le plus dur au niveau de l'attribution d'un effet significatif, et le **test LSD** qui est le plus tolérant (composé de simples t-tests).

2.2 Analyse en Composante Principale (ACP)

2.2.1 Définition

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions. C'est donc une méthode de réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des individus et des caractères. Cette réduction ne sera possible que si les p caractères initiaux ne sont pas indépendants et ont des coefficients de corrélation non nuls. L'ACP est une méthode factorielle car la réduction du nombre des caractères ne se fait pas par une simple sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des "facteurs". C'est une méthode linéaire car il s'agit de combinaisons linéaires.

2.2.2 Objet de la méthode

La méthode a pour objet de *décrire les données contenues dans un tableau d'individus et de caractères*. Ce tableau s'appelle matrice des données. Il se compose de lignes d'individus et de colonnes de variables. L'ACP, par une réduction des caractères, permet des représentations géométriques des individus et des caractères. Les caractères principaux doivent être indépendants (coefficient de corrélation nuls) et complémentaires au sens de l'information.

2.2.3 L'ACP est une méthode factorielle

La réduction du nombre de caractères ne se fait pas par une sélection de certains, mais par une construction de nouveaux caractères obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen de facteurs. C'est une méthode linéaire traitant des caractères numériques jouant tous le même rôle. Son but est d'obtenir une représentation d'un nuage $N(I)$ des individus de R_p dans un espace de dimension réduite. Il faut déterminer les axes qui prennent le mieux en compte la dispersion du nuage. Ces axes sont les axes factoriels qui permettent de représenter au mieux les points du nuage.

Il faut trouver le sous-espace E_k de dimension k ($k < p$ dimension de R_p) tel que l'inertie du nuage des individus $N(I)$ soit maximum. L'inertie (=l'équilibre) est la plus forte sur l'axe principal et la plus faible sur l'axe complémentaire. E_k est l'espace tel que l'inertie du nuage projeté sur E_k soit maximum. D'après le théorème de Huygens, E_k contient

nécessairement le centre de gravité du nuage. Conjointement, deux théorèmes mathématiques sont appliqués pour traiter le problème en plusieurs étapes :

Théorème d'inclusion : Si E_{k-1} est un sous espace vectoriel optimal de dimension $k-1$, alors la recherche d'un sous-espace vectoriel optimal de dimension k peut se faire parmi l'ensemble des sous-espaces vectoriels de dimension k contenant E_{k-1} .

Théorème de recherche d'un sous-espace vectoriel E de dimension k contenant un sous espace vectoriel F de dimension $k-1$ maximisant I . E est équivalente à la recherche d'un axe orthogonal D minimisant I .

2.2.4 Représentation des individus

L'espace des individus est représenté par des vecteurs, où chacun des individus est un vecteur. La mesure de la distance entre deux individus s'appelle "métrique".

Dans le cas d'une ACP réduite, les métriques les plus utilisées sont les métriques diagonales des inverses des variances qui reviennent à diviser chaque caractère par son écart type (pondération pour donner à chaque caractère la même importance). La métrique rend la distance entre individus invariante par transformation linéaire. De plus, elle donne à chaque caractère la même importance quelque soit leur dispersion car la même variance de 1 est donnée aux caractères.

Dans le cas d'une ACP non réduite, la métrique est $M=I$ elle revient à utiliser le produit scalaire usuel, elle conduit à privilégier les variables les plus dispersées pour lesquels les différences entre individus sont les plus fortes.

L'inertie totale du nuage de points est la moyenne pondérée des carrés des distances des n points au centre de gravité. Cette quantité mesure l'éloignement des points par rapport à leur centre de gravité, c'est-à-dire la dispersion globale du nuage. Cette inertie nulle signifie que tous les individus sont identiques ou presque et confondus avec leur centre de gravité g .

Les coordonnées des individus sur un nouvel axe s'obtiennent en projetant un individu sur une droite quelconque D . On crée un nouveau caractère c (ces valeurs sont les mesures algébriques des projections des points sur cette droite). Cette droite passe par l'origine qui est le centre de gravité du nuage, c est centré.

2.2.5 Représentation des caractères

L'espace des caractères est représenté aussi par des vecteurs, chaque caractère est un vecteur. La métrique utilisée est une matrice diagonale car :

- Le produit scalaire de deux caractères est la covariance,
- La longueur d'un caractère est égale à son écart type,
- Le cosinus de l'angle entre deux caractères est le coefficient de corrélation linéaire.

On résume chacun des caractères par sa moyenne et son écart type. L'individu dont les caractères auraient pour valeurs leurs moyennes respectives, s'appelle le centre de gravité du nuage.

$$\text{centre de gravité } (g) = \text{matrice des individus } X * \text{matrice diagonale des poids} \\ \text{(ou fréquences) associés à} \\ \text{chaque tirage}$$

Les liaisons entre les p caractères pris deux à deux sont résumées par leurs covariances, ou plutôt par leurs coefficients de corrélation ($(p(p-1))/2$). Les covariances sont regroupées dans une matrice V et les corrélations dans une matrice de corrélation R dont la diagonale est égale à 1 (matrices carrées d'ordre p symétrique). La matrice résume la structure des dépendances linéaires entre les p variables.

2.2.6 Interprétation des résultats

L'ACP construit de nouvelles variables artificielles et des représentations graphiques permettant de visualiser des relations entre variables ainsi que l'existence éventuelle de groupes d'individus et de groupes de variables.

Les corrélations sont synthétisées dans un cercle imaginaire à deux axes ou plus. Chaque axe représente une composante principale. On regarde la position des variables par rapport à cet axe

- Si les variables sont proches de la direction positive de l'axe alors elles sont corrélées,
- Si les variables sont proches de la direction négative de l'axe alors elles sont anti-corrélées,
- Si les variables sont proches d'un autre axe, alors elles sont non corrélées,

- On peut comparer les points, s'ils sont proches de la circonférence du cercle,
- Par contre, on ne peut rien dire quand les variables sont agglomérées au centre du cercle.

2.3 Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

2.3.1 Définition

L'objet des méthodes de classification hiérarchique est de rechercher à chaque étape les classes les plus proches, les fusionner jusqu'à qu'il n'y ait qu'une classe. Elle consiste à fournir un ensemble de partitions plus ou moins fines obtenues par regroupements successifs de parties.

2.3.2 Principe

Le principe de la CAH est de rassembler les observations ou les modalités d'une variable qualitative selon un critère de ressemblance défini au préalable. Les observations les plus "ressemblantes" seront ainsi réunies dans des groupes homogènes, lesquels se rassembleront plus ou moins rapidement en fonction de leur ressemblance.

La classification est ascendante car elle part des observations individuelles, elle est hiérarchique car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein.

La notion de "ressemblance" entre observations est évaluée par la distance entre les points : distance euclidienne dans le cas d'observations issues d'un tableau de mesures ou distance du Chi² dans le cas des modalités d'une variable qualitative issues d'un tableau de contingence.

Soient i et i' , 2 points dont on cherche la distance à partir d'un tableau de p paramètres,

Distance euclidienne :

$$d_{ii'}^2 = \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2$$

Distance du Chi² :

$$d_{ii'}^2 = \sum_{j=1}^p \left(\frac{f_{ij}}{f_{.i} \sqrt{f_{.j}}} - \frac{f_{i'j}}{f_{.i'} \sqrt{f_{.j}}} \right)^2$$

Il faut toutefois définir la façon dont sera calculée la distance entre 2 classes, c'est le critère d'agrégation qui sert à définir la "ressemblance" entre groupes :

- saut minimum (la distance retenue entre 2 groupes est la plus petite),
- saut maximum (la distance retenue entre 2 groupes est la plus grande),
- saut selon la moyenne (la distance retenue entre 2 groupes est la distance moyenne, c'est à dire entre les centres de gravité des 2 groupes),
- saut selon la variance ou algorithme de Ward (la distance retenue entre 2 groupes est celle qui minimise la variance intra-groupe tout en maximisant la variance inter-groupe)

Soient q et q' 2 les classes dont on souhaite évaluer la distance, q' est composé des observations A et B, la classe q a pour poids m_q , la classe A a pour poids m_A et la classe B a pour poids m_B .

$$d_{qq'}^2 = \frac{(m_q + m_A).d_{qA}^2 + (m_q + m_B).d_{qB}^2 - m_q.d_{AB}^2}{m_q + m_A + m_B}$$

Annexe N°3. La méthode SDM (Semantic Differential Method)

Il est souvent très important de pouvoir mesurer la signification émotionnelle d'un objet. Par exemple, lorsque l'on veut connaître le niveau d'estime qu'une personne a pour elle-même, les sentiments d'un étudiant vis à vis d'un cours ou la signification latente d'un rêve. La méthode différentielle sémantique, très largement utilisée, offre un moyen rapide, facile et fiable de mesurer la connotation émotionnelle des concepts. Créé par Osgood en 1957, Cette méthode a été appliquée dans le commerce, la psychologie clinique, la mesure de personnalité, les communications multiculturelles.

La méthode sémantique différentielle (SDM) consiste à lister les attributs sémantiques du produit à analyser et d'effectuer des tests d'utilisateur, dans lesquels l'utilisateur va évaluer le produit en fonction de ces attributs. Ces attributs sont le plus souvent définis par paires d'adjectifs antinomiques se reposant sur une échelle qualitative de sept points. Un espace sémantique, euclidien et multidimensionnel, est alors construit et analysé.

La figure ci dessous présente une carte de connotations, que Osgood a réalisé pour le mot "poli". Dans ce graphique, dix attributs sémantiques ont été utilisés. Les moyennes des réponses de deux groupes de vingt participants, concernant le mot "poli", ont été reportées sur ce graphique.

