



HAL
open science

Métaphores d'interaction pour la formation dans des environnements virtuels immersif: application à Meca 3D

Nicolas Muller

► **To cite this version:**

Nicolas Muller. Métaphores d'interaction pour la formation dans des environnements virtuels immersif: application à Meca 3D. Informatique et théorie des jeux [cs.GT]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019. Français. NNT : 2019TOU30154 . tel-02934555

HAL Id: tel-02934555

<https://theses.hal.science/tel-02934555>

Submitted on 9 Sep 2020

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *27/08/2019* par :
Nicolas MULLER

**Métaphores d'interaction pour la formation dans des
environnements virtuels immersifs : application à Meca 3D**

JURY

JEAN-PIERRE JESSEL	Université Toulouse 3	Directeur de thèse
PIERRE LAGARRIGUE	INU Champollion Albi	Directeur de thèse
BRUNO ARNALDI	INSA Rennes	Rapporteur
GUILLAUME MOREAU	École Centrale de Nantes	Rapporteur
DAVID PANZOLI	INU Champollion Albi	Encadrant de thèse
NANCY RODRIGUEZ- DESTRUEL	Université de Montpellier	Examinatrice

École doctorale et spécialité :

MITT : Informatique et Télécommunication

Unité de Recherche :

IRIT UMR 5505

Directeur(s) de Thèse :

Jean-Pierre JESSEL et Pierre LAGARRIGUE

Rapporteurs :

Bruno ARNALDI et Guillaume MOREAU

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu pendant la durée de ma thèse. Tout d'abord, mes encadrants : Pierre Lagarrigue, Jean-Pierre Jessel et David Panzoli. Pierre dont la porte est toujours ouverte et qui a su être à l'écoute et répondre à mes problèmes pendant toute la durée de la thèse, Jean-Pierre qui a pris le temps de suivre mon travail depuis Toulouse et m'a apporté des conseils avisés ainsi que David qui m'a guidé durant ces années et m'a accueilli dans son bureau pendant la phase de rédaction pour répondre à toutes mes questions quelle que soit leur pertinence.

Un grand merci aussi à tous mes collègues et amis qui m'ont servi de cobaye pour mes expériences en réalité virtuelle et avec qui nous avons partagé un bureau remplis de câble et de nombreuse pauses cafés.

Merci aux enseignants et étudiants de l'IUT GMP pour leur participation aux expériences et en particulier à Franck Lazary qui s'est occupé de l'organisation et du bon déroulement des deux sessions d'expérimentations.

Et finalement un grand merci à ma famille et aux lyonnais qui m'ont soutenu jusqu'au bout et particulièrement dans les périodes de doutes. Sans leur soutien inconditionnel je n'aurais jamais eu la chance d'arriver au bout de mes études.

*“Teaching should be such that what is offered is perceived as a valuable gift and not as hard
duty.”*
— *Albert Einstein*¹

1. “Education for Independent Thought” New York Times, 5/10/1952

Table des matières

Chapitre 1 Introduction générale	10
1.1 Problématique et verrous	10
1.2 Contexte et motivations	11
1.3 Périmètre de nos recherches	11
1.3.1 Objectifs	11
1.3.2 Livrables	12
1.3.3 Considérations éthiques	12
1.4 Organisation du mémoire	12
Chapitre 2 Contexte	14
2.1 Introduction	14
2.2 Jeux sérieux	14
2.3 Jeux d'apprentissages immersifs	16
2.4 Les leviers de l'apprentissage	18
2.4.1 Motivation et expérience optimale	18
2.4.2 Apprentissage expérientiel, rétroactions et adaptativité	20
2.5 Évaluation des jeux d'apprentissages immersifs	23
2.6 Conclusion du chapitre	24
Chapitre 3 Revue des méthodes d'interaction pour jeu d'apprentissage im-	
mersif	25
3.1 Introduction	25
3.1.1 Périphériques considérés	26
3.1.2 Les maux du simulateur	27
3.1.3 Les jeux étudiés	28
3.2 Méthode de sélection	30
3.2.1 Techniques de lancer de rayon	32

3.2.2	Techniques utilisant une main virtuelle	32
3.2.3	Problématiques	33
3.2.4	Évaluation	34
3.2.5	Prototypes et retours d'expérience	34
3.3	Manipulation	38
3.3.1	Problématiques	40
3.3.2	Évaluation	40
3.3.3	Les méthodes de sélection-manipulation utilisées dans le jeu vidéo .	41
3.3.4	Prototypes et retours d'expérience	43
3.4	La navigation	45
3.4.1	Problématiques	46
3.4.2	Le déplacement dans les jeux vidéos	46
3.4.3	Évaluation	47
3.4.4	Prototypes et retours d'expérience	47
3.5	Conclusion	52
Chapitre 4 Meca3D		53
4.1	Introduction	53
4.2	Scénario proposé	53
4.2.1	Introduction aux contrôles	55
4.2.2	Préparation du tour conventionnel	56
4.2.3	Opérations de chariotage et dressage	56
4.2.4	Passage du tour conventionnel au tour à commande numérique . . .	57
4.2.5	Réglage de la contre-pointe d'un tour à commande numérique . . .	57
4.2.6	Réglage du zéro sur un tour CN	58
4.2.7	Lancement de l'usinage sur tour CN	58
4.3	Design de l'application	59
4.3.1	Translation d'objets suivant un axe	60
4.3.2	Rotation autour d'un axe à l'aide d'une poignée	60
4.3.3	Vissage ou rotation d'un bouton	61
4.3.4	Mise en place de la pièce à usiner	61
4.3.5	Boutons	63
4.3.6	Mise en évidence d'objet dans la scène	64
4.3.7	Affichage tête haute	64
4.3.8	Assistant pédagogique	65

4.4	Implémentation / systèmes	66
4.4.1	Sliders	66
4.4.2	Scénarisation	66
4.4.3	Usinage procédural	67
4.4.4	Animations	67
4.4.5	Traces	68
4.5	Conclusion	68
Chapitre 5 Expérimentations avec Meca3D		69
5.1	Introduction	69
5.2	Déroulement des expérimentations	70
5.2.1	Première session – Enseignants	70
5.2.2	Deuxième session – Étudiants	70
5.3	Démographie des participants	70
5.3.1	Première session – Enseignants	70
5.3.2	Deuxième session – Étudiants	71
5.4	Résultats de la première session	71
5.4.1	Expérience utilisateur	71
5.4.2	Traces logicielles	72
5.4.3	Mal du simulateur	75
5.5	Résultats de la deuxième session	77
5.5.1	Expérience utilisateur	77
5.5.2	Mal du simulateur	78
5.5.3	Questions de cours	81
5.6	Conclusion	82
Chapitre 6 Conclusion et perspectives		83
6.1	Conclusion	83
6.2	Pistes d’améliorations	84
6.2.1	Design sonore	84
6.2.2	Leviers d’apprentissage et game design	84
Annexe A Storyboard originel de Meca3D		86
Annexe B Contrat de phase		88

Table des figures

2.1	Exemples de jeux d'apprentissages immersifs	17
2.2	Le modèle de la motivation selon Malone et Lepper	19
2.3	La zone de flow	20
2.4	Modèle de l'apprentissage expérientiel	21
2.5	Debriefing en ligne pour le jeu <i>World of Warcraft</i>	22
3.1	Exemples de périphériques d'interaction	26
3.2	Taxonomie des méthodes de sélection	30
3.3	Dispositif d'expérimentation de la relation tête-regard	35
3.4	Expérimentation permettant de déterminer la différence entre la direction de la tête et celle du regard avec un casque de réalité virtuelle	35
3.5	Différences entre regard et direction de la tête	36
3.6	Expérimentation de la relation tête-regard	37
3.7	Durée du mouvement contre indice de difficulté	38
3.8	Albi vu d'en haut	38
3.9	Taxonomie des méthodes de manipulation	39
3.10	Oculus First Contact	42
3.11	Prototype de pont roulant contrôlé a l'aide d'un Leap Motion	43
3.12	Prototype d'une méthode d'interaction permettant le réglage d'une contre- pointe	44
3.13	Taxonomie des méthodes de déplacement	45
3.14	Téléportation à l'aide d'un rayon courbe dans The Lab	46
3.15	Vue d'ensemble de la scène et ses points d'intérêt.	48
3.16	Carte interactive des points d'intérêts	49
3.17	Méthode de déplacement "Segway", le vecteur vitesse est perpendiculaire à la droite entre les paumes de l'utilisateur	49
3.18	La technique du <i>tunelling</i> consiste à flouter (image ci-contre) ou masquer la région correspondant à la vision périphérique lors du déplacement continu.	50
3.19	Carroussel de machine-outils	51
4.1	Capacités interactionnelles du tour conventionnel de Meca3D	54
4.2	Capacités interactionnelles du tour à commande numérique de Meca3D	54
4.3	Assistant pédagogique virtuel dans Meca3D donnant une instruction	55
4.4	L'assistant pédagogique virtuel de Meca3D montrant comment ouvrir le capot d'un tour conventionnel	56

4.5	Ouverture de la porte du tour à commande numérique dans Meca3D . . .	60
4.6	Rotation à l'aide d'une poignée	61
4.7	Réglage de la contre-pointe	62
4.8	Le bouton rotatif du panneau de contrôle possède la même affordance que les vis	63
4.9	Récupération et positionnement du brut dans le tour conventionnel	64
4.10	Les boutons du panneau de commande du tour à commande numérique . .	65
4.11	Le composant <i>slider</i> visualisé dans l'éditeur	66
4.12	Usinage procédural de la pièce	67
5.1	Distribution de l'âge des participants pour la première session	69
5.2	Distribution de l'âge des participants pour la deuxième session	70
5.3	Modèle de l'expérience utilisateur	72
5.4	Session 1 : Résultat du questionnaires expérience utilisateur	73
5.5	Session 1 : Répartition du temps passé par activité	74
5.6	Session 1 : Temps passé à interagir ou regarder le menu	75
5.7	Session 1 : Répartition des réponses au questionnaire RSSQ	76
5.8	Session 2 : Expérience utilisateur	77
5.9	Session 2 : Résultats pour le mal du simulateur	80
5.10	Session 2 : Résultat du questionnaire RSSQ en fonction du temps passé dans le monde virtuel	80
5.11	Session 2 : Répartition des résultats aux questions de cours	81

1

Introduction générale

L'éducation est, depuis longtemps, un domaine en constante évolution où, historiquement, l'introduction de nouveaux médias tels que des manuels de classe, des vidéos et, plus récemment, des jeux d'apprentissage ont permis de faire évoluer les formations et de faciliter leur diffusion au plus grand nombre. Le plus récent de ces médias est la réalité virtuelle qui est maintenant utilisée depuis plusieurs décennies pour des formations spécifiques dans lesquelles il est possible de supporter le coût du matériel.

Grâce aux récentes avancées dans ce domaine et à l'avènement des casques de réalité virtuelle, divisant le coût de déploiement des formations en faisant usage, il devient possible d'envisager la conception de formations utilisant ces techniques dans de nombreux secteurs. Nous nous focaliserons dans ce manuscrit sur le domaine du génie mécanique et, plus particulièrement, sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation à l'utilisation de machines-outils.

1.1 Problématique et verrous

La réalité virtuelle étant un nouveau média il est nécessaire de ré-imaginer les formations en faisant usage pour en tirer le meilleur parti. En effet, le champ de possibilités n'est pas le même que celui des médias auxquels nous sommes habitués et il est donc nécessaire de comprendre dans quelles situations et sous quelle forme l'utilisation de ces outils sera pertinente.

La richesse de ce média provient principalement des possibilités nouvelles qu'il apporte pour la visualisation et pour l'interaction. L'abondance des techniques et des dispositifs, notamment suite à l'essor récent des casques de réalité virtuelle grand public, offre une grande variété de possibilités dans la conception des méthodes de visualisation et d'interaction avec l'environnement virtuel et/ou les autres utilisateurs [Podwal et al.(2016)]. Cependant, cette variété rend également plus difficile le choix de ces méthodes, du fait de la nécessité d'offrir à l'utilisateur un environnement cohérent et intuitif.

Cette profusion se reflète aussi dans les méthodes d'évaluation. En effet la littérature foisonne de cadres théoriques pour l'évaluation des applications à visée pédagogique, des jeux d'apprentissage, des applications de réalité virtuelle, et des méthodes d'interaction dans les environnements virtuels. Cependant cette richesse des méthodes d'évaluation rend

difficile la comparaison des études présentées dans la littérature et les dernières avancées techniques dans le domaine de la réalité virtuelle rendent obsolète un certain nombre de ces études.

Finalement, dans l'article [Bowman et al.(2006)], une nouvelle direction pour la recherche en réalité virtuelle est proposée à partir du constat que, malgré de nombreuses avancées dans le domaine, peu d'applications dépassent le stade de prototype et les cas réels d'application sont très rares. La solution proposée dans l'article pour pallier à cette observation est d'affiner la recherche déjà produite en concrétisant les cas d'utilisation dans des domaines spécifiques – dans notre cas la formation au génie mécanique.

1.2 Contexte et motivations

Le contexte d'application de nos recherches est un jeu d'apprentissage immersif dédié à la fois à la formation initiale en génie mécanique et à la formation continue de professionnels dans l'atelier de production. À travers un certain nombre de scénarios pédagogiques mis en œuvre dans un atelier virtuel, ce jeu d'apprentissage immersif abordera l'utilisation et le réglage de machines outils à commande numérique, les étapes d'une chaîne de production depuis la conception jusqu'au contrôle qualité des pièces produites, et la collaboration entre les différents intervenants dans la chaîne. Le cadre méthodologique se veut généraliste et les interactions proposées doivent être réutilisables dans d'autres situations.

Ce contexte apporte un certain nombre de contraintes spécifiques. Premièrement, l'expérience du public ciblé avec les dispositifs de réalité virtuelle impose que les interactions proposées soient comprises instinctivement par des utilisateurs n'ayant jamais eu d'expérience préalable. Deuxièmement, la simplicité de mise en œuvre des formations, notamment les formations collaboratives impliquant simultanément plusieurs apprenants, requiert l'utilisation de dispositifs peu encombrants, mobiles et peu coûteux. Les casques de réalité virtuelle représentent une technologie prometteuse nouvellement remise au goût du jour, mais dont les apports concrets doivent encore être explorés. Le dernier point concerne l'évaluation des méthodes et des dispositifs engagés. Les critères d'évaluation existants, basés principalement sur des mesures d'efficacité ou d'utilisabilité ne semblent pas être des critères suffisants dans un cadre pédagogique et de nouvelles méthodes d'évaluation doivent être utilisées pour mesurer l'expérience utilisateur [Tcha-Tokey et al.(2015a)].

De plus la recherche présentée dans ce manuscrit prouve l'intérêt que portent les enseignants pour la réalisation d'un jeu de formation immersif à l'utilisation de machines outils et discute leurs attentes pour intégrer ce genre d'outils aux formations existantes.

1.3 Périmètre de nos recherches

1.3.1 Objectifs

L'objectif de cette recherche est de proposer un cadre méthodologique permettant la conception, la réalisation et l'évaluation d'un outil de formation à l'utilisation de machines outils en mettant l'accent sur le choix des méthodes d'interactions.

Dans ce cadre, l'objectif est de proposer une série de métaphores interactionnelles permettant l'utilisation de l'application dans un contexte de formation. Les utilisateurs n'ayant aucune expérience préalable avec ce genre d'outils, il est nécessaire de proposer un *framework* permettant une prise en main rapide par des utilisateurs novices. Ces contraintes de facilité d'utilisation et de la prépondérance de la pédagogie sur l'interaction font qu'il est nécessaire d'établir un protocole expérimental s'intéressant à des métriques venant des différents domaines qui nous intéressent.

1.3.2 Livrables

Ces travaux de recherches ont donné lieu à la réalisation des livrables suivant :

Un *framework* d'interaction dédié à la formation au génie mécanique avec des interactions spécifiques à ce domaine.

Une application de formation en réalité virtuelle utilisant ce *framework* d'interaction dans le cadre d'un scénario pédagogique mettant en œuvre deux machines-outils.

Un protocole expérimental permettant l'évaluation de cette application de formation.

Des résultats des expérimentations menées avec des étudiants et des professionnels du domaine du génie mécanique.

1.3.3 Considérations éthiques

Une application en réalité virtuelle proposant un taux de rafraîchissement trop faible ou mal conçue (voir section 3.1.2) peut amener l'utilisateur à se sentir mal à l'aise voire même malade. De plus, une expérience VR bien conçue proposant un contenu offensant (ex : violence, sang, ...) peut également rendre l'utilisateur mal à l'aise. En effet, voir ce genre de scène dans un environnement virtuel immersif est bien plus prégnant que sur un écran. Dans tous les prototypes réalisés au cours de cette thèse, nous nous sommes efforcés de produire des expériences plaisantes pour les participants en proposant des applications avec un taux de rafraîchissement stable et en s'assurant pendant la phase de développement que les prototypes testés ne généraient que peu de mal du simulateur.

1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé de la façon suivante : tout d'abord nous avons commencé par cette introduction permettant de mettre en place les différentes idées et contraintes explorées dans le reste du manuscrit. Dans le chapitre 2, nous continuons à mettre en place le contexte dans lequel nous nous plaçons en nous intéressant aux applications et jeux d'apprentissages proposés dans la littérature ainsi qu'aux modalités permettant de faciliter la transmission de connaissance et l'évaluation de ces applications.

Suite à cela, dans le chapitre 3 nous nous intéressons aux spécificités liées à l'utilisation de la réalité virtuelle en commençant par une étude des problématiques du mal du

simulateur, avant de s'intéresser plus particulièrement aux modalités interactionnelles proposées dans la littérature mais aussi dans les jeux vidéos développés exclusivement pour les casques de réalité virtuelle nouvelle génération. Cette description est découpée en trois parties : la sélection, la manipulation et la navigation. Pour chacune de ces parties nous proposons un aperçu des techniques décrites dans la littérature, nous nous intéressons aux problématiques soulevées ainsi qu'aux modalités d'évaluation avant de discuter les prototypes réalisés au cours de la thèse.

Nous enchaînons ensuite avec une description de Meca 3D dans le chapitre 4 dans laquelle nous commençons par présenter le scénario pédagogique retenu, puis les interactions proposées et, finalement, les systèmes annexes qui ont été développés pour créer cette application.

Le chapitre 5 continue avec les expérimentations qui ont été menées en deux phases à l'IUT GMP de Toulouse. Dans ce chapitre, nous décrivons le protocole expérimental utilisé avant de discuter nos résultats suivant trois axes principaux : l'expérience utilisateur, le mal du simulateur et l'aspect pédagogique.

Dans la conclusion chapitre 6, nous mettons les résultats des expérimentations en perspective avec ce que nous avons vu dans le reste du manuscrit avant de nous intéresser aux pistes d'amélioration possibles et au futur de Meca 3D.

2

Contexte

2.1 Introduction

Cette thèse s’inscrit dans une période d’évolution importante du domaine de la Réalité Virtuelle (RV). En effet dans l’intervalle de temps où la thèse s’est déroulée, les premiers casques de réalité virtuelle grand public ont été commercialisés². Cet avènement des casques de RV réduit significativement le coût de déploiement de formations utilisant cette technologie, la plupart des applications immersives décrites dans la littérature jusque là ayant été réalisées pour d’autres types de dispositifs de rendu comme des systèmes CAVE (*CAVE Automatic Virtual Environment* [Cruz-Neira et al.(1993)]) où des prototypes spécifiquement conçus pour leurs expériences.

De même, le domaine des jeux d’apprentissages est actuellement en plein essor avec de nombreux projets en cours visant à améliorer les techniques utilisées pour leur réalisation et à proposer des applications à visée éducative dans la plupart des domaines de formation.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à ces projets et particulièrement aux fondements théoriques sur lesquels ils reposent ainsi que les cadres conceptuels et modes d’évaluation qu’ils utilisent.

2.2 Jeux sérieux

Pour l’écrire de manière prosaïque, un jeu sérieux est un jeu (vidéo) dont la finalité n’est pas le simple divertissement, mais qui joue sur cette corde pour faciliter l’assimilation d’un objectif plus sérieux : démarche marketing ou politique, conscientisation ou apprentissage. Plus précisément, [Alvarez(2007)] propose la définition suivante :

“Application informatique, dont l’objectif est de combiner à la fois des aspects sérieux(Serious) tels, de manière non exhaustive, l’enseignement, l’apprentissage, la communication, ou encore l’information, avec des ressorts ludiques issus du jeu vidéo(Game). Une telle association a donc pour but de s’écarter du simple divertissement.”

2. Si on excepte les rares dispositifs antérieurs, comme le *Virtual Boy* de Nintendo sorti en 1995

C'est l'application à l'apprentissage qui intéresse particulièrement la communauté scientifique, à travers une discipline appelée le *Game-Based Learning* (GBL), qui s'est emparé de ce champ de recherche depuis le début des années 2000 et s'attache à en étudier les mécanismes.

Traditionnellement, les jeux vidéo ont plutôt mauvaise presse, et leur utilisation dans un cadre pédagogique peut paraître surprenante de prime abord. La mauvaise influence des jeux vidéo sur les joueurs est couramment soulignée... et questionnée dans la foulée. Par exemple, [Anderson & Bushman(2001)] suggèrent que la pratique de jeux vidéo violents accroît les pensées agressives, l'excitation physiologique, l'insensibilisation aux scènes de violence, et nuit aux comportements sociaux. Au contraire, [Ferguson(2007)] montre le lien entre la pratique de jeux vidéo (violents ou non) et les capacités d'orientation dans l'espace mais il ne trouve pas de corrélation avec un comportement agressif. D'autres effets sont fréquemment cités, comme la difficulté à réguler le temps de jeu [Ogletree & Drake(2007)], l'addiction et l'isolation sociale [Griffiths & Davies(2005)] ou encore les nausées dues à certains équipements immersifs [Merhi et al.(2007)].

En contrepartie de ces réticences, le GBL a beaucoup contribué à mettre en valeur les bénéfices des jeux vidéo, particulièrement pour l'apprentissage ou la modification des comportements et des attitudes [Boyle et al.(2011)]. Dans une revue systématique de l'impact positif des jeux sérieux pour l'apprentissage, [Connolly et al.(2012)] relèvent que de nombreuses études font état de bénéfices multiples, dont les plus courants sont l'acquisition de savoirs et les aspects motivationnels. En fait, l'intérêt de l'utilisation d'un jeu sérieux réside surtout dans les multiples compétences qu'il impacte positivement, au delà de la seule acquisition des savoirs. Une étude de [Hainey et al.(2016)] à l'école primaire identifie ainsi un effet positif sur les compétences affectives, motivationnelles, perceptuelles, cognitives et relationnelles des élèves. En outre, l'étude révèle une capacité inédite à modifier les conceptions et influencer le comportement ou la conduite. Dans le cadre de la formation professionnelle de jeunes adultes (bac-3 à bac+5), les études menées dans le cadre de l'utilisation en classe du projet Mecagenius ont mis en évidence une optimisation de la durée de la formation [Galaup et al.(2015), Pons-Lelardeux et al.(2015)].

Dès 2005, Zyda [Zyda(2005)] plaide pour que la communauté RV intègre les jeux vidéos dans son développement, de la même manière qu'elle l'a fait par le passé pour l'informatique graphique, l'interaction homme-machine et la simulation. Selon lui, l'intégration d'éléments caractéristiques des jeux vidéo dans les applications de RV leur confèrent un plus grand potentiel d'attractivité et améliore leur impact dans le cas de formations et d'apprentissages. Cependant, l'hypothèse que la seule présentation d'un contenu sous la forme d'un jeu vidéo suffise à garantir de meilleurs résultats de l'apprentissage a rapidement été invalidée, notamment par [Cameron & Dwyer(2005)] qui mettent en évidence, dans un cas d'étude, une absence totale de différence entre apprentissage avec le jeu et sans. Les bénéfices de l'approche sont réels dès lors que les ressorts du jeu vidéo sont intégrés et utilisés avec pertinence.

2.3 Jeux d'apprentissages immersifs

Les jeux d'apprentissages immersifs relèvent de cet effort de synthèse entre les capacités d'immersion visuelle d'un utilisateur dans un dispositif de RV et celles d'immersion psychologique d'un joueur dans un jeu vidéo. Ils ont montré leur intérêt dans le cadre de la formation professionnelle, principalement pour l'enseignement des protocoles ou des processus métier dans des contextes techniques, comme par exemple dans les projets décrits ci-dessous, illustrés dans la figure 2.1.

Le projet 3D Virtual Operating Room [Lelardeux et al.(2016), Panzoli et al.(2016)] permet d'aborder le respect des procédures, la gestion de l'information et la communication entre les professionnels du bloc opératoire pendant une intervention chirurgicale. Toujours dans le domaine de la santé, VICTEAMS [Huguet et al.(2016)] propose une formation aux personnels du service de santé des armées face aux situations de crises et à l'afflux massif de blessés. Le projet GASPARE [Buche(2005), Querrec(2010)] cible l'apprentissage des procédures et la sécurité sur un porte-avion. Le projet V3S [Barot et al.(2013)] propose une formation aux risques pour les sous-traitants intervenants dans les sites classés SEVESO. Le projet VTT [Crison et al.(2005)] a pour objectif de former des ouvriers à l'utilisation et la maintenance de fraiseuses. Il existe encore de nombreux exemples d'applications comme l'entraînement virtuel des chirurgiens à la laparoscopie [Nagendran et al.(2013)], la formation au diagnostic automobile [Duval(2017)] (Fig. 2.1(f)), la formation des soldats aux règles qui commandent ou non d'ouvrir le feu en situation complexe [Bhagat et al.(2016)], ou divers applications de formation aérospatiale [Stone et al.(2011)]. On remarque que malgré leur apparente hétérogénéité, toutes ces applications relèvent de formations QHSE (Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement), qui se prêtent très bien à l'approche et qui constituent de ce fait l'essentiel de l'offre de la formation immersive.

Ces projets concrets sont très souvent des applications de travaux de recherche plus vastes sur l'apprentissage immersifs. Le cœur de la recherche porte sur des méthodologies ou des cadres conceptuels qui permettent d'allier les nombreuses problématiques de ce type de projet, notamment (i) la modélisation de l'environnement et des activités, (ii) les interactions entre le(s) joueur(s) et l'environnement et (iii) le comportement des personnages non joueurs. On citera parmi les plus abouties les approches MASCARET [Chevaillier et al.(2012)], HUMANS [Lourdeaux et al.(2017)] et GVT [Gerbaud et al.(2008)].

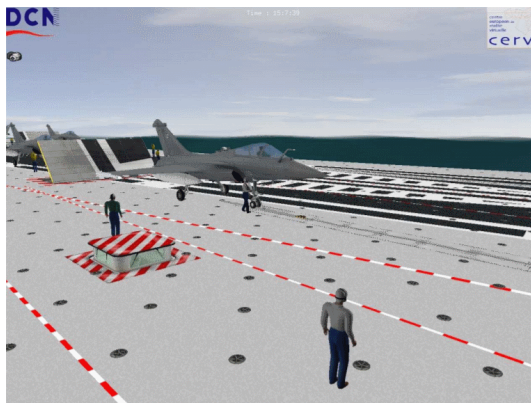
Le principal atout de la formation immersive réside en la reproduction d'un environnement de travail de manière visuellement réaliste et permettant à un ou plusieurs apprenants de restituer avec précision leur activité professionnelle. Si les jeux d'apprentissages immersifs s'inspirent des techniques du jeu vidéo pour proposer des narrations pédagogiques "gamifiées", ils reposent néanmoins souvent sur des environnements virtuels traditionnels, comme les environnements virtuels immersifs (EVI) ou les environnements virtuels pour l'apprentissage humain (EVAH). En outre, des recherches récentes ont mis en évidence la pertinence des environnements immersifs réalistes pour l'apprentissage de compétences professionnelles [Moon(2013)], particulièrement car ils permettent d'une part une mobilisation rapide dans la formation des savoirs pré-existants, et d'autre part une transposition pertinente dans les situations réelles futures des savoirs acquis dans l'envi-



(a) 3D Virtual Operating Room (3DVOR), 2016



(b) Virtual Characters for team Training : Emotional, Adaptive, Motivated and Social (VICTEAMS), 2017



(c) Gestion Aviation sur Porteavions par la Réalité virtuelle (GASPAR), 2008



(d) Virtual Reality for Safe Seveso Subcontractors (V3S), 2011



(e) Virtual Technical Trainer (VTT), 2005



(f) Diag'Adventure, 2017

FIGURE 2.1 – Les jeux d'apprentissages immersifs se prêtent à de nombreux cas d'usage mais on distingue dans la pratique deux principaux objectifs de formation : entraînement individuel aux protocoles et formation collaborative à la communication. L'apprentissage de gestes techniques est, traditionnellement, plutôt réservé à des simulateurs.

ronnement virtuel durant la formation [Rose et al.(2000)].

L'apport du jeu vidéo consiste généralement à proposer un sous-ensemble pertinent de mécanismes dans le but d'accroître, par l'intermédiaire d'un ensemble de "leviers de gamification" [Chou(2015)], le succès de la transmission des savoirs.

2.4 Les leviers de l'apprentissage

Dans le cadre général, des mécanismes de jeu sont greffés à un contenu sérieux (pédagogique, en l'occurrence) dans l'objectif de faciliter l'acquisition de ce dernier par les apprenants. Ce processus s'appelle la ludification (ou *gamification* en anglais) et s'apparente à l'élaboration d'une recette de cuisine en ce sens (i) qu'il consiste à mélanger de manière empirique des ingrédients dont on connaît (souvent approximativement) l'effet dans un contexte donné, que (ii) le résultat final est souvent difficile à anticiper sur la seule base des ingrédients et (iii) que le succès de la recette est très lié à l'expérience du cuisinier (le *game designer* en l'occurrence).

Dans le contexte d'un jeu d'apprentissage immersif en revanche, l'approche semble mieux cernée, et les raisons qui favorisent l'acquisition des connaissances ou des compétences sont connues. Elles sont présentées dans les deux sections suivantes, dont le découpage est arbitraire et pourrait être discuté tant les concepts discutés sont liés les uns aux autres.

2.4.1 Motivation et expérience optimale

Le premier constat qu'on peut formuler à l'égard d'un jeu sérieux immersif est son approche pédagogique clairement active, par opposition par exemple à une pédagogie transmissive, plus traditionnelle. Les nombreuses théories de la motivation fournissent dès lors autant cadres théoriques pertinents dans l'étude de cet objet d'apprentissage [Fenouillet et al.(2009)].

Une des théories classiques de la motivation [Deci & Ryan(2000)] distingue la motivation intrinsèque, où l'activité est réalisée librement par intérêt et/ou pour le plaisir de pratiquer, et la motivation extrinsèque, où l'activité est réalisée sous la contrainte d'une obligation ou d'un devoir. Bien entendu, c'est la motivation intrinsèque qui est ciblée par un jeu d'apprentissage. [Malone(1987)] identifie quatre conditions qui rendent un tel outil intrinsèquement motivant, chacune intégrant plusieurs heuristiques synthétisées dans la figure 2.2. Le défi proposé à l'apprenant, à travers la difficulté de l'activité, doit être constamment optimal : objectifs explicites, incertitude quant à l'issue, rétroaction encourageante sur les performances, et promotion d'un sentiment de compétence. La complexité et la part d'information révélée au joueur doivent être en rapport avec l'état actuel de

ses connaissances : l'apprenant doit découvrir par ses interactions, être surpris ou intrigué. L'application doit maintenir chez l'apprenant un sentiment de contrôle et d'auto-détermination : contingence entre ses actions et leur(s) résultat(s), l'environnement doit promouvoir la possibilité de faire des choix, et les actions du joueur doivent avoir des effets visibles. Enfin, l'application doit promouvoir une certaine forme d'imaginaire : résonance émotionnelle avec l'apprenant, recours à des métaphores ou des analogies pertinentes, et l'imaginaire de l'application et la réalité de l'activité doivent être contextuellement intégrés et proches.

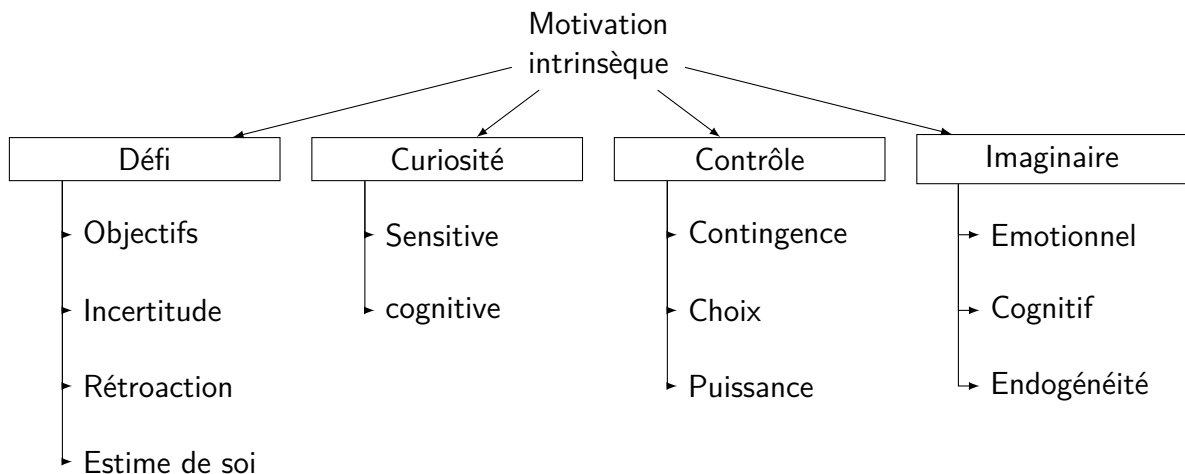
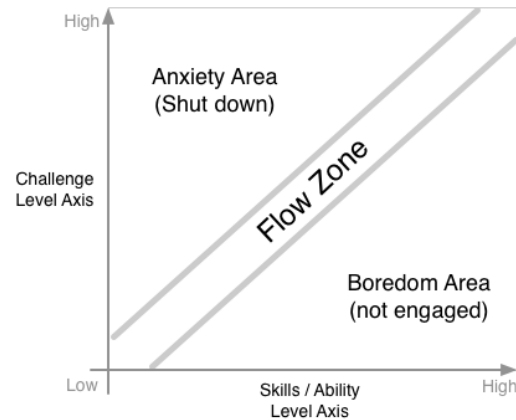


FIGURE 2.2 – Le modèle de Malone et Lepper explicite les leviers de la motivation intrinsèque.

Dans une approche similaire, [Hidi & Renninger(2006)] distinguent, dans l'implication de l'apprenant dans un jeu d'apprentissage, des intérêts situationnel et individuel. L'intérêt situationnel est un état émotionnel provoqué par des caractéristiques extérieures (situation incongrue, identification à un personnage, travail en groupe, etc). Il a peu d'influence sur les connaissances et les comportements de l'individu mais, s'il est soutenu, toujours par le biais de stimuli externes, il peut éventuellement laisser émerger l'intérêt individuel. Ce dernier correspond à un état plus durable et plus stable aussi. De fait, il impacte plus durablement les connaissances de l'apprenant, qui éveille seul sa curiosité et est plus enclin à fournir un effort. [Yaman et al.(2008)] met en évidence les effets disparates de configuration pédagogiques différentes sur ces deux types d'intérêt. Ainsi, ils observent que des simulations au contenu équivalent utilisant des exemples pré-conçus ont un meilleur impact sur l'intérêt situationnel des participants que celles reposant sur la résolution de problèmes.

Une autre manière de caractériser cet état de motivation exacerbée est l'état d' "expérience optimale" (ou *flow*), théorisé par [Csikszentmihalyi(1997)]. Un apprenant (ou plus généralement un joueur) fait l'expérience de l'état de *flow* lorsqu'il est tellement impliqué dans l'activité (le jeu) qu'il se déconnecte de son environnement extérieur (temps, fatigue, etc). Cet état est atteint lorsqu'il est dans la "zone de *flow*" (voir figure 2.4.1), un équilibre parfait entre le défi proposé et ses compétences, comme illustré dans la figure 2.4.1. Dans

FIGURE 2.3 – L'état de flow est un état psychologique susceptible d'être provoqué chez le joueur ou l'apprenant dans des conditions spécifiques qu'on retrouve sous le nom de zone ou canal de flow. Cette zone met en évidence un rapport parfaitement équilibré entre le défi proposé au joueur/apprenant, et l'état actuel de ses capacités/compétences. Elle est bordée par une zone d'anxiété (défi trop important) et une zone d'ennui (défi pas assez important). Le trajet idéal du joueur ou de l'apprenant dans le jeu, ou respectivement le jeu d'apprentissage, est un accroissement proportionnel des compétences et du défi.



l'état de *flow*, la concentration de l'apprenant est maximale, et donc légitimement on fait l'hypothèse qu'il est dans les meilleures conditions possibles pour apprendre, ce que Jean Heutte appelle l'environnement optimal d'apprentissage [Heutte(2017)]. Un des grands principes du *game design*, et particulièrement dans la conception des jeux d'apprentissages, consiste à programmer la mise de l'apprenant dans l'état de *flow*, par le truchement de nombreuses techniques et en connaissance de leurs effets [Zichermann & Cunningham(2011)]. Le jeu vidéo *Flow*, baptisé du nom du phénomène, est issu du travail de recherche de Jenova Chen [Chen(2007)]. Il illustre parfaitement l'approche de conception "orientée-*flow*". [Hamari et al.(2016)] montrent qu'une gestion adaptative du défi proposé permet aux apprenants de mieux apprendre.

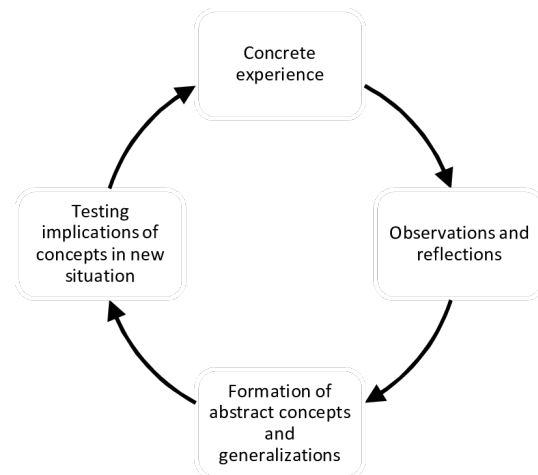
2.4.2 Apprentissage expérientiel, rétroactions et adaptativité

L'aptitude d'un environnement virtuel ou d'une simulation immersive à fournir des situations d'apprentissage "situé" est un fait établi dont les mécanismes ont été étudiés et décrits [Dawley & Dede(2014)]. Un tel apprentissage est caractérisé par un contexte et des situations authentiques, et la liberté pour l'apprenant de construire des connaissances et des stratégies qu'il saura réinvestir par la suite plus efficacement que dans un mode d'instruction plus classique [Herrington & Oliver(2000)].

Le célèbre modèle du cycle de l'apprentissage par l'expérience (voir figure 2.4), qu'on attribue classiquement à David Kolb [Kolb(1984)] mais qui dérive en fait d'une idée originale de Kurt Lewin, illustre les étapes qui mènent de l'observation concrète à l'élaboration d'une théorie, elle-même donnant lieu, par confrontation à la réalité, à de nouvelles observations, et à une nouvelle itération de la boucle, et ainsi de suite. Ce cycle se compose de 4 étapes,

L'expérience concrète est une situation rencontrée par l'apprenant dans l'environ-

FIGURE 2.4 – *Le modèle de l'apprentissage par l'expérience est un cycle dans lequel les expériences concrètes de l'apprenant dans l'environnement de formation en modifiant graduellement sa compréhension, et l'entraînent dans une démarche consciente et active d'acquisition et de révision de ses connaissances.*



nement d'apprentissage ou, en ce qui concerne l'apprentissage immersif, une situation virtuellement reconstituée au plus proche de la situation réelle.

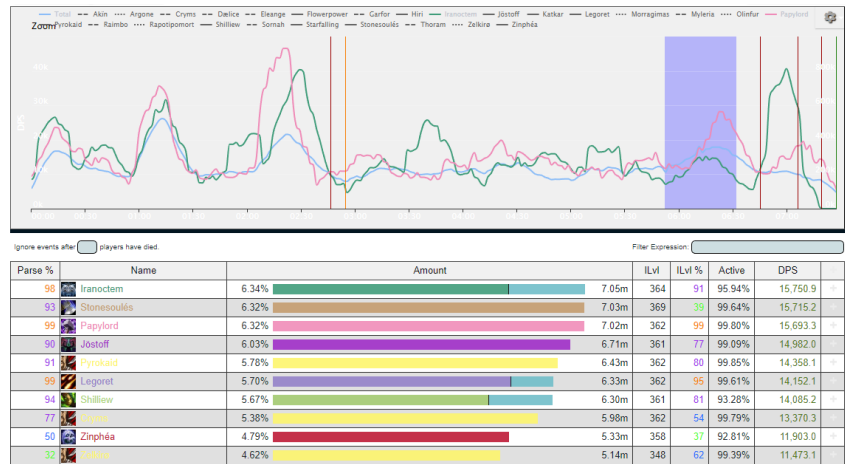
L'observation réflexive permet de mettre en évidence les écarts ou les incohérences entre les observations réelles (ou virtuelles) et celle qui étaient attendues ou prévues par l'apprenant, en l'état de ses connaissances et de sa compréhension des règles de l'environnement. Durant cette étape, l'apprenant peut être accompagné dans son processus par le professeur ou, dans un environnement d'apprentissage immersif, par un système d'accompagnement et/ou des rétroactions de la part de l'outil.

La conceptualisation abstraite donne naissance à un nouveau concept, une nouvelle idée, ou modifie la compréhension existante de l'apprenant.

L'expérimentation active pousse l'apprenant à éprouver les idées et concepts nouvellement créés au contact de l'environnement. Ce processus se concrétise par la formulation d'hypothèses que l'apprenant teste dans des contextes ou des situations connexes mais différentes de celles qui ont permis l'apprentissage. Les observations issues de ces tests permettent d'initier un nouveau cycle de l'apprentissage immersif. Bien entendu, dans le cas de l'apprentissage immersif, il est impératif que l'environnement d'apprentissage soit conçu de manière à permettre cette liberté.

Le cycle d'apprentissage expérientiel est une des fondations théoriques des jeux d'apprentissage immersifs. Ces derniers offrent d'une part des expériences concrètes et authentiques à l'apprenant, et facilitent d'autre part la conceptualisation en le guidant durant le processus réflexif. Ce guidage, ou accompagnement utilisateur pour utiliser le terme approprié, prend plusieurs formes mais repose essentiellement sur un monitoring en temps réel des actions et des décisions du joueur donnant lieu à des rétroactions en temps réel. [Cameron & Dwyer(2005)] montrent que la qualité des rétroactions joue un rôle important dans l'apprentissage. Ils mettent en évidence une meilleure rétention des connaissances lorsque les rétroactions sont des réponses élaborées et explicatives par rapport à des *feedbacks* bruts. D'un point de vue personnel, nous pensons que cette boucle de rétroaction peut également jouer un rôle parasite à l'apprentissage en perturbant ou en interrompant trop souvent l'apprenant pour lui offrir un retour détaillé sur les actions réalisées et sur les méthodes à déployer pour s'améliorer. Ce trop plein d'information, parfois non perti-

FIGURE 2.5 – Exemple d'un des nombreux graphiques disponibles en ligne pour World Of Warcraft (www.warcraftlogs.com) et qui en constitue un débriefing détaillé permettant au joueur d'analyser a posteriori leurs décisions et de les comparer à celles de joueurs plus expérimentés.



mentales, peut nuire au sentiment de *flow* et lui donner l'impression de perdre son temps. En conséquence, il est important lors de la conception d'un système d'accompagnement de bien différencier les informations qui nécessitent d'être présentées à l'apprenant en temps réel, et celles, plus élaborées et accaparant une charge mentale plus importante, qui doivent être reléguées en dehors du jeu, classiquement en *e-learning* dans une phase de débriefing.

Le jeu vidéo *World of Warcraft* est une bonne illustration d'un bon dosage du *feedback*. La plupart des joueurs expérimentés utilisent des *add-ons* pour obtenir un indicateur de performance générale durant les combats (par exemple dégâts infligés par secondes). Ceux ayant réellement envie de progresser utilisent un service de débriefing disponible en ligne (voir figure 2.5) pour analyser leur façon de jouer ou la comparer à celle de joueurs meilleurs. L'accompagnement se fait donc en deux temps : un premier indicateur synthétique est donné en temps réel, puis un débriefing des combats menés durant la partie est proposé à la fin de la session de jeu. Cette décomposition en deux temps permet au joueur de commencer par essayer d'améliorer l'indicateur de performance générale en adaptant sa façon de jouer de façon instinctive, avant d'utiliser le débriefing final pour prévoir une meilleure stratégie pour la session suivante.

Une autre forme de rétroaction rencontrée couramment dans les jeux vidéo prend la forme d'un contrôle adaptatif de la difficulté du jeu. [Orvis et al.(2008)] démontrent un accroissement significatif de l'apprentissage et de la motivation lorsque la difficulté est ajustée en fonction des performances de l'apprenant dans le jeu. On retrouve à travers cette idée une tentative du jeu de maintenir l'apprenant dans la zone de *flow*, évoquée dans la section précédente. En outre, les auteurs relèvent que les joueurs ayant une expérience du jeu vidéo obtiennent de meilleurs résultats tout au long de l'expérimentation, mais que ceux qui n'en ont pas connaissent une progression plus importante.

Théories de la motivation et apprentissage expérientiel fournissent un cadre général

permettant d'attester théoriquement de la pertinence des jeux d'apprentissages immersifs. Dans la pratique cependant, il n'existe pas de cadre concret régissant, normalisant ou guidant l'évaluation du résultat de cet apprentissage. De fait l'évaluation d'un jeu d'apprentissage immersif s'inspire autant de celle des environnements immersifs que de celle des outils pédagogiques.

2.5 Évaluation des jeux d'apprentissages immersifs

L'évaluation d'un jeu d'apprentissage immersif ou des Environnements de réalité Virtuelle pour l'Apprentissage Humain (EVAH) est rendue plus complexe que celle d'un Environnement virtuel Immersif (EVI) à cause de la dimension pédagogique.

Il existe des critères "historiques" permettant d'évaluer la performance ou l'utilisabilité de nombreux composants d'un EVI. Par exemple, la loi de Fitts (voir 3.2.4) permet de caractériser la précision et la rapidité d'une tâche de sélection, le test RSSQ (voir la partie 3.1.2) permet d'estimer le degré de mal du simulateur ressenti par l'utilisateur, etc. D'autres notions plus diffuses comme l'engagement, la présence ou la satisfaction sont également un centre d'attention pour les chercheurs [Lin & Parker(2007)]. Plus récemment, les recherches sur le sujet de l'évaluation d'un environnement immersif se sont portées sur la modélisation intégrée de l'expérience utilisateur (UX). Le modèle de référence est celui de [Shin et al.(2013)]. À l'instar des autres modèles de l'UX, il se présente sous la forme d'un ensemble de constructions mentales caractérisant l'UX (présence, satisfaction, utilité perçue, etc.) et d'un ensemble de métriques associées permettant de les évaluer de manière quantitative. Les auteurs proposent également un questionnaire prêt à l'emploi où chaque métrique est évaluée par l'utilisateur selon une échelle de Likert à 7 points. [Tcha-Tokey et al.(2015b)] proposent un modèle "holistique" qui synthétise et combine les modèles de l'UX les plus influents.

Cependant, la dimension pédagogique joue assurément un rôle important. Premièrement, elle pourrait guider un choix de modélisation : le choix entre le déplacement ou la téléportation dans un jeu sérieux immersif sera vraisemblablement guidé par l'intérêt pédagogique d'évaluer le déplacement du joueur (par exemple, la traversée interdite d'une zone stérile dans le bloc opératoire, le passage dans une zone dangereuse à proximité d'une machine outil, etc). Deuxièmement, il est probable que l'impact de la formation en terme de transmission et de transposition des savoirs (dans le monde réel) soit liés à d'autres critères, nouveaux ou composites, et qui restent à explorer et à évaluer.

S'agissant d'un outil pour l'apprentissage humain, [Tricot(2007)] rappelle dans son cadre conceptuel que 3 dimensions doivent être prises en compte dans l'évaluation, chacune étant importante pour le succès de l'outil :

L'utilité reflète l'adéquation entre l'objectif défini et l'apprentissage effectif ou, en d'autres termes, à quel point l'outil a rempli son rôle dans la transmission des savoirs. Des test objectifs de connaissances doivent permettre d'établir l'utilité de l'outil.

L'utilisabilité caractérise à quel point il est facile ou possible d'utiliser le système de manière efficiente. Il s'agit ici de mesurer la qualité des interfaces et la pertinence de l'accompagnement, par le biais d'entretiens ou d'observations.

L'acceptabilité détermine la propension de l'utilisateur à utiliser l'outil pour sa formation de son propre gré, ou bien si l'outil lui est imposé par un enseignant, la propension de ce dernier à sélectionner l'outil dans le cadre de sa formation. Des entretiens permettent de mesurer l'acceptabilité d'un outil de formation.

[Hoareau et al.(2017)] s'intéressent à la mesure de la validité de l'environnement immersif de formation, à travers deux notions distinctes : la validité interne concerne l'acquisition des savoirs dans l'environnement. La validité externe concerne la transposition des savoirs, c'est à dire la capacité à réinvestir les connaissances ou les compétences acquises dans l'environnement réel après la formation.

Hormis les questionnaires et les entretiens, [Loh(2007)] suggère que les traces numériques laissées par les utilisateurs durant leur exploration du jeu ou de l'outil de formation sont autant de signaux qui, une fois agrégées et/ou élaborés, sont à même de fournir autant d'indicateurs objectifs et pertinents quant à l'utilisabilité du jeu, voire son utilité.

2.6 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons vu des exemples concrets de jeux d'apprentissages immersifs qui utilisent des représentations de l'environnement de travail pour permettre la reproduction de l'activité professionnelle enseignée ce qui facilite la mobilisation des savoirs pré-existants et permet la transposition dans des situations réelles. Dans ces jeux d'apprentissages, les mécaniques du jeu-vidéo sont utilisées pour favoriser l'implication de l'apprenant et visent à faire apparaître la sensation de *flow*. De plus, l'utilisation d'environnement immersifs peuvent permettre l'apprentissage expérientiel en guidant l'apprenant dans une démarche d'acquisition et de validation de ses connaissances. Finalement, nous avons vu différentes méthodes permettant l'évaluation des jeux d'apprentissages immersifs qui peut se faire au travers de l'expérience utilisateur. [Tricot(2007)] propose trois indicateurs : l'utilisabilité, l'utilité et l'acceptabilité qui relèvent à la fois de l'expérience utilisateur mais incluent des problématiques plus concrètes comme l'utilité qui demande une validation de la capacité de l'application à transmettre des connaissances.

Comme nous l'avons vu dans cette partie, les mécanismes du jeu-vidéo utilisés dans les jeux d'apprentissages servent, au travers du *game-design*, à faciliter l'apprentissage. Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons aux briques élémentaires qui sont à notre disposition pour créer une telle application en réalité virtuelle.

3

Revue des méthodes d'interaction pour jeu d'apprentissage immersif

3.1 Introduction

Ce chapitre propose une revue des méthodes d'interaction pour les jeux d'apprentissages immersifs, dans cette revue nous associerons les avancées de la littérature dans le domaine avec les exemples concrets et testables des jeux vidéos grand public sortis en même temps que les casques de réalité virtuelle nouvelle génération. Dans cette partie seront également présentés les prototypes réalisés afin de pouvoir éprouver les méthodes qui nous paraissaient les plus pertinentes, ajoutant ainsi à l'apport de la littérature une expérience concrète des méthodes proposées.

La grande variété de méthodes d'interaction proposées par la littérature en RV ou en IHM, la multiplicité des périphériques disponibles ainsi que les différences dans l'évaluation de ces méthodes rend difficile le choix de celles à utiliser dans un contexte spécifique. Dans la suite de ce travail, nous nous attacherons à proposer un cadre méthodologique permettant le choix d'interactions cohérentes et pertinentes pour une application à visée pédagogique.

Le contexte d'application est un jeu d'apprentissage immersif dédié à la fois à la formation initiale en génie mécanique et à la formation continue de professionnels dans l'atelier de production. À travers un certain nombre de scénarios pédagogiques mis en œuvre dans un atelier virtuel, ce jeu d'apprentissage abordera l'utilisation et le réglage de machines outils à commande numérique et les étapes d'une chaîne de production depuis la conception jusqu'au contrôle qualité des pièces produites. Le cadre méthodologique se veut généraliste et les interactions proposées se doivent d'être réutilisables dans d'autres situations.

Les casques de RV sont des dispositifs nouveaux, et le public visé n'a généralement pas (ou très peu) d'expérience avec ces appareils. C'est un aspect important à prendre en compte dans nos travaux de recherche. Cette inexpérience du public ciblé avec les dispo-

sitifs de RV impose de proposer des interactions qui puissent être instinctivement comprises par des utilisateurs n'ayant aucune expérience préalable. Le dernier point concerne l'évaluation des méthodes et des dispositifs engagés.

3.1.1 Périphériques considérés



(a) XBOX controller



(b) Leap motion



(c) Oculus Touch



(d) Vive controller

FIGURE 3.1 – *Exemples de périphériques d'interaction*

La mise en oeuvre simple de formations, notamment collaboratives et impliquant simultanément plusieurs apprenants, requiert l'utilisation de dispositifs peu encombrants, mobiles et peu coûteux. Pour cela, les casques de RV représentent une technologie prometteuse nouvellement remise au goût du jour, et dont les apports concrets en terme d'expérience utilisateur ont été explorés chapitre 4.

Pour ce qui est des périphériques d'interaction, les mêmes contraintes de prix, d'encombrement et de disponibilité doivent être prises en compte. Cela nous a permis de restreindre nos recherches à essentiellement une famille de contrôleur en plus des contrôleurs habituels (souris, clavier, manette) : les contrôleurs VR.

Nous verrons dans les sections suivantes que les métaphores les plus courantes pour la sélection et la manipulation d'objets dans un environnement virtuel reposent sur l'utilisation d'une main virtuelle que ce soit pour des opérations de pointage ou de sai-

sie/manipulation. Parmi les technologies grand-public, il existe deux types de périphériques permettant de diriger une main virtuelle : les périphériques utilisant des algorithmes de vision pour détecter la pose de la main de l'utilisateur (*Leap Motion*) et les contrôleurs à 6 degrés de libertés qui permettent de récupérer la position de la main ainsi que d'utiliser des boutons pour métaphoriser les interactions avec l'EVI. Ces périphériques ont chacun leurs avantages : les premiers permettent une reproduction fidèle de la pose de la main de l'utilisateur alors que les seconds pourront être représentés dans l'EVI par un outil, une main ou n'importe quel objet que l'utilisateur arrive à identifier comme la manette qu'il tient dans la main.

Les contrôleurs physiques ont l'avantage de permettre aux utilisateurs d'avoir une sensation de préhension. Cela a été exploré dans [Achibet et al.(2014)] où la sensation de préhension d'un objet virtuel au travers de méthodes visio-haptiques avec des contrôleurs physiques a été observée. Cette observation a été réitérée en comparant le *Leap Motion* et les contrôleurs du Vive pour la préhension d'objets dans un environnement virtuel. Avec les contrôleurs, la sensation de préhension existe grâce au retour haptique de la gâchette que l'utilisateur maintient enfoncée alors qu'avec le *Leap Motion* cette sensation de préhension n'existe pas en fermant la main dans le vide.

Finalement, si ces périphériques, notamment les casques de VR, facilitent l'immersion et permettent de proposer de nouvelles formes d'interactions avec un environnement immersifs, elles peuvent aussi générer du mal du simulateur.

3.1.2 Les maux du simulateur

Si elle est plus souvent présentée comme une corne d'abondance remplie de solutions et de progrès, la RV offre aussi une face plus sombre : la cybermaladie (*VR sickness* en anglais). Ce fléau des technologies d'immersion freine encore l'adoption massive des jeux d'apprentissages immersifs, malgré les progrès constants. La cybermaladie s'exprime sous différentes formes qui nuisent de différentes manières à l'expérience de l'utilisateur dans l'environnement immersif : d'une sensation d'inconfort à de véritables nausées. Il est difficile de quantifier avec précision la fraction d'utilisateurs concernés car elle a de multiples causes, qui affectent les utilisateurs différemment. On peut tout de même avancer que tout utilisateur peut potentiellement en faire l'expérience, plus ou moins rapidement, quel que soit son profil.

La fatigue oculaire est un symptôme courant. Elle s'explique par le fait que la distance des objets de la scène sur lesquels se porte le regard est "virtuellement" plus grande que celle de l'écran sur lequel ils sont affichés. La mise au point des yeux ne doit pas s'effectuer à la distance de l'objet (comme dans la réalité) mais à celle de l'écran. Ceci provoque un conflit dit d'accommodation vergence, qui est connu pour engendrer des maux de tête et une fatigue oculaire importante. Des solutions ont été apportées pour réduire la fatigue

dans les affichages stéréoscopiques, par exemple l'application adaptative en temps réel de filtres de flou sur les zones de l'image qui mettent à mal la convergence et l'accommodation [Leroy et al.(2012)].

La cybercinétose (les anglophones parlent de *Visually Induced Motion Sickness*) est un autre mal du simulateur qui est ressenti lors des déplacements (du regard ou de l'avatar). Son expérience est similaire au mal des transports que nous pouvons éprouver en voiture ou en bateau par exemple.

Une de ses causes est induite par des perturbations dans la boucle sensori-motrice. Notamment, le délai entre les mouvements (de la tête par exemple) et la mise à jour de l'image perturbe le réflexe vestibulo-oculaire dans sa mission de maintien de la direction de notre regard lorsque nous bougeons ou nous déplaçons. Cette cause tend à disparaître à mesure que le matériel évolue et que les délais des traitements informatiques raccourcissent.

Une seconde cause, admise comme plus importante, concerne l'intégration sensorielle. Dans ce cas, la cybercinétose provient d'un conflit entre plusieurs de nos sens, en l'occurrence la perception visuelle et la perception vestibulaire. Prosaïquement, l'illusion de déplacement de l'utilisateur dans l'environnement virtuel (qu'on appelle vection), en conflit avec la sensation "interne" d'être physiquement immobile, provoque chez ce dernier une nausée incommode caractéristique. La théorie explicative prévalente est celle du conflit sensoriel [Reason & Brand(1975)] mais, plus récemment, est apparue une nouvelle théorie posturale [Smart Jr et al.(2002)] qui semble mieux expliquer certains phénomènes liés à la démographie des profils impactés. Quelque soit l'explication, les études notent que l'expérience répétée entraîne une habitude à la cybercinétose [Hill & Howarth(2000)], phénomène déjà observé depuis longtemps chez les pilotes par l'armée de l'air [McCauley et al.(1976)]. Dans les environnements immersifs, des méthodes efficaces ont été mises en évidence pour réduire voire éliminer la cybercinétose en adaptant le champ de vision de l'utilisateur : floutage de la zone de vision périphérique [Fernandes & Feiner(2016)] ou ajustement d'un "nez virtuel" [Whittinghill et al.(2015)].

Finalement, l'évaluation du mal du simulateur est effectuée en faisant passer aux participants d'une expérimentation le questionnaire révisé du mal du simulateur (*Revised Simulator Sickness Questionnaire* ou RSSQ [Kim et al.(2004)]) avant et après avoir utilisé l'application. Ce questionnaire contient les symptômes les plus courants et ce protocole permet de distinguer les symptômes causés par le simulateur de ceux déjà ressentis par les participants avant le début de l'expérimentation.

3.1.3 Les jeux étudiés

Pour nous guider dans les choix de conception de notre application, nous avons passé en revue de nombreux jeux. Comme il n'était pas possible de les tester tous, nous n'avons retenus que ceux qui étaient les mieux classés par les joueurs sur les deux plateformes marchandes les plus populaires pour les jeux en RV : *Steam* et *Oculus*. En particulier *The Lab* et *Oculus First Contact* ont été de grandes sources d'inspiration car ce sont les jeux proposés comme introduction à la RV respectivement par Valve et Oculus Studio. Ils cherchent donc à répondre à une problématique commune : permettre la prise en main

de l'application de façon intuitive pour rentrer le plus vite possible dans le vif du sujet.

The Lab [Valve(2016)] propose 8 activités différentes reliées par un *hub* central avec pour thème principal le monde de *Portal*³. En pratique ces activités sont des prototypes développés par différentes équipes de chez Valve avec pour objectif d'expérimenter les possibilités de la VR en mettant l'accent sur les possibilités interactionnelles de leurs nouvelles manettes. La première activité proposée est une activité d'exploration appelée *Postcards* qui propulse le joueur dans un environnement virtuel rendu de manière réaliste. Cette activité a pour vocation de faire découvrir le système de locomotion utilisé dans toute l'application et permet aussi de jouer au lancer de bâton avec un chien robotique virtuel. Suite à cela l'utilisateur se retrouve dans le *hub* central dans lequel il peut se déplacer pour choisir une activité. Les autres activités proposent du tir à l'arc, l'utilisation d'une catapulte (dans un jeu similaire à *Angry Birds*), un jeu d'arcade de type *Bullet Hell* en 3D, l'exploration du système solaire avec la possibilité de ramasser, déplacer et jeter des planètes, une représentation du corps humain où il est possible de visualiser différents types de scanners et d'apprendre le nom des différents composants du corps humain, une expérience interactive dans le monde de *Portal* qui pourrait s'apparenter à un film interactif, et finalement une activité nommée *Secret Shop* qui se déroule dans l'univers de *Dota 2*⁴ où le joueur peut interagir avec des objets magiques et découvrir des secrets et des sorts.

Oculus First Contact [Oculus(2016)] est lancé automatiquement à la fin de l'installation d'un Oculus Rift et, en plus de sa qualité d'introduction à la prise en main des manettes, met l'accent sur le sentiment de "présence" qu'il est possible de ressentir grâce à la VR. Le joueur, guidé par un robot découvre des gadgets étonnants dans une ambiance féerique.

Fantastic Contraptions [Northway Games and Radial Games(2016)] est un jeu de puzzle dans lequel les joueurs construisent des machines à partir d'éléments de construction qu'ils assemblent afin de répondre à des défis. Le principe est d'utiliser des barres possédant différentes spécificités et des moteurs afin de résoudre les problèmes. Le but étant, généralement, de construire une machine qui passera les obstacles du niveau sans que le joueur puisse la contrôler directement.

The Gallery Call of the Starseed [Cloudhead Games(2016)] est un jeu d'aventure et d'exploration où le joueur part à la recherche de sa soeur dans une aventure mystérieuse. Le jeu propose de nombreux puzzles, des objets utilisables pour résoudre des énigmes et un inventaire complexe mais facile d'utilisation.

Soundstage [Hard Light Labs(2017)] est un peu à part car ce n'est pas un jeu vidéo mais plutôt une application de conception musicale assistée par ordinateur. En effet, bien que vendu sur *Steam*, cette application permet de créer un synthétiseur modulaire à partir de différents éléments (tables de mixage, *sampler*, séquenceurs, oscillateurs, ...) qu'il est possible de relier sans les limites habituelles de coût du matériel permettant ainsi de créer

3. Jeu vidéo connu et apprécié du grand public

4. Un autre titre célèbre du même studio

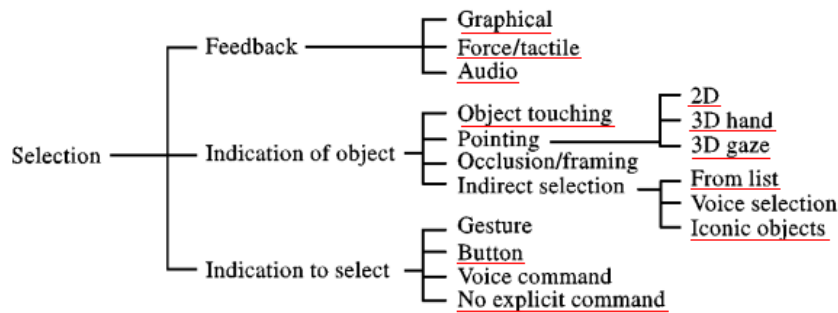


FIGURE 3.2 – Taxonomie des méthodes de sélection [Bowman(1999)]. Les éléments implémentés nous permettant d’acquérir une expérience concrète sont soulignés en rouge.

des systèmes inimaginables jusqu’à présent.

L’organisation du reste de cette partie repose sur la catégorisation en trois grandes familles des méthodes d’interaction proposée par Bowman [Bowman & Hodges(1999)] : les opérations de sélection, de manipulation et la navigation.

Les figures 3.2 et 3.9 présentent la taxonomie des méthodes de sélection-manipulation proposée par [Bowman & Hodges(1999)]. Cette taxonomie vise à décrire une grande majorité des possibilités interactionnelles dans un environnement virtuel immersif et nous a servi de support pour l’élaboration de prototypes afin de les évaluer dans notre domaine d’application.

3.2 Méthode de sélection

La sélection est l’opération permettant à l’utilisateur de spécifier des objets de l’EVI pour effectuer des actions ultérieures, et nécessaire à l’élaboration de méthodes d’interactions complexes [Bowman & Hodges(1999), Bowman et al.(2001b), Steed(2006)]. En raison de son côté indispensable aux autres tâches d’interaction, la sélection a reçu un grand intérêt de la part de la communauté scientifique [Argelaguet & Andujar(2013)]. Dans cette sous-partie, nous nous intéresserons uniquement aux techniques et défis liés à la sélection dans un environnement virtuel mais les concepts abordés s’appliquent aussi pour les méthodes de manipulations en faisant usage.

Dans une application classique, la sélection correspond généralement à cliquer sur l’objet à sélectionner. Avec un casque de RV, la souris n’est pas utilisable de cette façon, le pointeur n’étant plus visible. La transposition de cette méthode de sélection donne lieu à deux grandes familles : les méthodes de “lancer de rayon” [Steed(2006), Argelaguet & Andujar(2013)] qui correspondent à pointer un objet (du regard ou avec une main virtuelle) et les méthodes basées sur “main virtuelle” [Steed(2006), Argelaguet & Andujar(2013)] où l’utilisateur touche un objet pour le sélectionner. Il existe également une dernière famille de techniques de sélection, la sélection par menu, qui ne sera pas abordée dans cette

partie. Le reste de cette section sera consacré à la question du classement des techniques d'interaction pour la sélection.

Les techniques de sélection ont été catégorisées par [Argelaguet & Andujar(2013)] suivant 9 critères : l'outil de sélection, le contrôle de l'outil, les degrés de liberté de l'outil de sélection, le rapport commande / affichage (*control/display ratio* en anglais), la relation entre l'espace moteur et l'espace visuel, les mécanismes de désambiguïsation, le déclencheur, et la rétroaction.

L'outil de sélection est le volume dans le monde virtuel qui détermine quel objet sera sélectionné par intersection ou proximité. Le contrôle de l'outil détermine l'interface entre l'utilisateur et l'outil de sélection (i.e. : ce que l'utilisateur peut faire pour contrôler l'outil de sélection). Le nombre de degrés de liberté de l'outil de sélection est déterminé par le mécanisme de contrôle ; avec un nombre de degrés de liberté plus élevé l'utilisateur gagne en possibilité mais au prix d'une complexité d'interaction plus élevée. Le rapport commande / affichage correspond au rapport qui détermine l'effet du contrôle dans le monde réel sur l'affichage dans le monde virtuel (par exemple déplacer sa main de 2cm dans le monde réel déplace la main de 2m dans le monde virtuel).

Le mécanisme de désambiguïsation est utilisé quand plus d'un objet est sélectionné par l'outil de sélection forçant l'utilisateur à décider lequel est la cible de la sélection. [Argelaguet & Andujar(2013)] répartissent ces mécanismes en trois groupes : 1. la désambiguïsation manuelle qui donne le contrôle total à l'utilisateur au risque d'agrandir la charge cognitive de l'utilisateur. 2. L'approche heuristique qui essaie de déterminer la bonne cible au risque de se tromper forçant l'utilisateur à recommencer l'étape de sélection. 3. Et finalement, l'approche comportementale qui est une extension de l'approche heuristique mais utilise les informations sur le comportement de l'utilisateur tout au long du processus de sélection pour déterminer la bonne cible - maximisant ainsi les chances de trouver l'objet que l'utilisateur souhaitait sélectionner.

Le déclencheur est la façon dont l'utilisateur valide l'action de sélection. [Bowman et al.(2001b)] listent quatre options pour la confirmation : événement (par exemple appui sur un bouton), geste, commande vocale et sélection sans commande explicite. Cette liste à été étendue par [Steed(2006)] et [Argelaguet & Andujar(2013)] pour inclure "appuyer pour sélectionner", "maintenir pour sélectionner" et "attendre pour sélectionner".

La rétroaction est indispensable à l'opération de sélection et sert à donner à l'utilisateur un retour sur l'action qu'il effectue. L'approche habituelle est d'utiliser au moins un retour visuel, par exemple afficher une représentation de l'outil de sélection sous forme de main virtuelle ou de rayon de sélection. Dans un deuxième temps, les objets qui ont été sélectionnés peuvent être mis en surbrillance pour informer l'utilisateur que l'objet est sélectionné ou quel objet le sera après déclenchement de l'action de sélection.

3.2.1 Techniques de lancer de rayon

La sélection basée sur le lancer de rayon correspond à utiliser un rayon partant d'un périphérique dont on connaît la position et l'orientation (casque de RV / contrôleur RV / doigt pointé détecté avec un *Leap Motion*) et de sélectionner l'objet le plus proche de l'utilisateur qui intersecte le rayon [Steed(2006), Argelaguet & Andujar(2009)].

En l'absence d'autre périphérique que le casque de RV ou dans le cas où les autres périphériques d'entrée sont réservés pour d'autres interactions, la sélection au regard est préconisée [Yao et al.(2014)]. Elle consiste à placer un viseur dans la direction donnée par l'orientation de la tête. La sélection se fait alors à l'aide du rayon partant du centre de la tête et dirigé par son orientation. Elle peut être déclenchée par une action de l'utilisateur (par exemple l'appui d'une touche) ou par simple passage de ce rayon sur un objet avec éventuellement un temps d'attente. Cette deuxième option pose le problème de la sélection involontaire (qu'on retrouve sous le nom de *Midas Touch*). De plus, même dans le cas du déclenchement par une action de l'utilisateur, cette méthode de sélection est contraignante, car elle nécessite de viser précisément un objet avec son regard (ou en pratique, sa tête) pour pouvoir le sélectionner.

Utiliser la sélection au regard introduit également le risque de fausser les données oculométriques disponibles en obligeant l'utilisateur à fixer des objets pour les sélectionner – empêchant ainsi l'interprétation de ces données. Une partie de l'inconfort généré par cette méthode de sélection vient de l'approximation de la direction du regard par celle de la tête (fournie à l'application par le casque de RV) qui force l'utilisateur à tourner la tête plus que s'il voulait regarder l'objet sans viseur au centre de l'affichage. Le système d'approximation proposé dans la section 3.2.5 peut permettre de réduire ce problème mais l'inexactitude du modèle rend son utilisation complexe dans un cas réel où la direction du buste de l'utilisateur n'est pas connue.

3.2.2 Techniques utilisant une main virtuelle

La solution alternative, demandant un système de suivi de mouvement et ne permettant que la sélection à faible distance est la sélection se basant sur la collision entre une main virtuelle (dirigée par la main de l'utilisateur dans le monde réel) et l'objet à sélectionner. L'avantage de cette méthode de sélection est son intuitivité. En effet la main virtuelle est identifiée par l'utilisateur comme sa propre main et la sélection se fait en "touchant" l'objet virtuel ou en l'attrapant si la sélection est déclenchée en appuyant sur une gâchette du contrôleur ou en fermant la main (pour le *Leap Motion*).

Une faiblesse de cette technique d'interaction est le fait que dans sa forme naturelle (c'est à dire avec un rapport commande / affichage de 1) il est impossible de sélectionner des objets hors de portée de main. Il existe cependant des interactions utilisant la main virtuelle permettant de sélectionner des objets naturellement hors de portée comme la technique d'interaction Go-Go [Poupyrev et al.(1996)] qui applique un rapport non linéaire

entre la main virtuelle et la main réelle au delà d'une certaine distance entre le torse et la main de l'utilisateur. Cependant cette méthode ne permet que d'agrandir le champ d'action de l'utilisateur sans garantir que n'importe quel objet sera accessible depuis n'importe où.

[Bowman & Hodges(1997)] ont suggéré une alternative qu'ils ont appelée la technique go-go étendue (*stretch go-go* en anglais) ou la distance entre le torse et la main de l'utilisateur est répartie en trois zones : si la main réelle est proche du torse de l'utilisateur, la main virtuelle se rapproche, si elle est loin, la main virtuelle s'éloigne et une zone de manipulation entre les deux laisse la main virtuelle en place.

3.2.3 Problématiques

La problématique la plus connue des méthodes de sélection est le toucher de Midas (*Midas Touch* en anglais) qui peut se produire lorsque la sélection s'effectue sans déclencheur. Ce phénomène rend quasi obligatoire l'utilisation d'un périphérique proposant au moins un bouton pour pouvoir proposer des interactions utilisables. Même si, en l'absence de bouton pour le déclenchement, il est toujours possible d'utiliser un temps d'attente comme déclencheur, le choix de sa durée est complexe car il est difficile de trouver un juste milieu entre un temps trop court ne résolvant pas le problème et un temps trop long qui peut frustrer l'utilisateur et qui nuira à son immersion dans le monde virtuel.

Une autre problématique est celle de l'occultation ou de la proximité d'objets sélectionnables qui peut rendre difficile la sélection de l'objet voulu. En plus des exemples triviaux tels qu'un objet en masquant un autre, [Steed(2006)] présente des exemples concrets exhibant ces risques : pour la sélection avec une méthode de lancer de rayon, un "gros" objet présent derrière un objet difficile à sélectionner (de par sa taille ou sa forme) présente le risque que l'utilisateur n'arrive pas à sélectionner efficacement celui de devant et sélectionne par erreur celui de derrière. Pour les méthodes basées sur un volume de sélection telles que celle de la main virtuelle, deux objets proches l'un de l'autre posent le risque de sélectionner le mauvais si le volume de sélection intersecte les deux objets sélectionnables en même temps. Ces exemples relèvent d'un environnement trop encombré et une solution est de les prévenir dans la phase de conception de l'application. Une alternative est d'utiliser une méthode de sélection demandant la discrimination par l'utilisateur entre les différents objets potentiellement sélectionnables (par exemple la méthode proposée dans [Bacim et al.(2013)]).

Une dernière problématique est "l'effet Heisenberg" ([Bowman et al.(2001a)]) qui est un phénomène provoqué par le mouvement du contrôleur lors de l'appui d'un bouton durant une opération de sélection par exemple pour la valider. Le risque est alors de rater l'objet à sélectionner à cause de ce mouvement involontaire. La solution proposée par [Bowman et al.(2001a)] est d'utiliser l'autre main pour effectuer l'opération de validation si cet effet est significatif avec le périphérique utilisé.

3.2.4 Évaluation

L'évaluation des méthodes de sélection est généralement effectuée à l'aide de la loi de Fitts [Soukoreff & MacKenzie(2004)]. Cette loi relie la vitesse avec laquelle un utilisateur est capable de sélectionner un objet avec la précision dont il fait preuve en proposant un paramètre, le *throughput* ou indice de performance comme l'inverse du coefficient reliant linéairement le temps nécessaire à sélectionner une cible avec l'indice de difficulté de cette cible (calculé à partir de la taille de la cible et de la distance à parcourir pour atteindre cette cible). Ce *throughput* est un indicateur comparable entre les différentes méthodes de sélection et exprime le compromis entre la précision et la rapidité dont les utilisateurs font preuve en utilisant cette méthode de sélection – le *throughput* inclue tous les éléments de la boucle d'interaction et reflète à la fois les caractéristiques matérielles et logicielles du système étudié.

3.2.5 Prototypes et retours d'expérience

(a) Relation tête-regard

Nous nous sommes intéressés à l'utilisation des informations fournies par les casques de RV pour permettre la sélection dans le monde virtuel. Cette technique, généralement appelée sélection au regard et proposée dans le guide des bonnes pratiques de l'*Oculus Rift* [Yao et al.(2014)], utilise la position et l'orientation du casque pour permettre une sélection basée sur le lancer de rayon. Elle est fréquemment utilisée pour des applications de réalité virtuelle mobiles.

Dans cette configuration où l'utilisateur porte une casque de RV, il est impossible de connaître la direction du regard⁵. Dès lors, la direction de la tête est la seule information disponible. Nous nous sommes donc demandé si il était possible d'estimer la direction dans laquelle l'utilisateur regarde à partir de la seule connaissance de la direction de son regard.

En effet, l'étude de la direction du regard passionne la communauté scientifique depuis plus d'un siècle grâce aux nombreuses applications qui peuvent en être faites, à la fois pour des études d'ergonomie [Poole & Ball(2006)] ou de psychologie [Mele & Federici(2012)], ou encore pour s'en servir en tant que méthode d'entrée [Smith & Graham(2006)].

La première étude que nous proposons est donc l'étude de cette relation avec pour objectif d'obtenir des données qui nous permettront d'établir une relation mathématique utilisable dans le cadre d'une méthode d'interaction avec l'environnement virtuel.

Dans une étude s'intéressant à la même problématique, [Sherstyuk et al.(2012)] n'observent pas de différence significative entre la direction du point de vue des utilisateurs et celle de leur regard, tout en notant que cette approximation se justifie probablement par le faible champ de vision des casques utilisés (champ de vision diagonal compris entre 40 et 60 degrés). Dans notre cas, le casque utilisé pour cette étude est l'Oculus Rift DK2 proposant un champ de vision diagonal de 110 degrés. De plus, d'autres études menées

5. Il existe tout de même des intégrations d'*eye tracker* dans des casques RV, comme celle d'un Tobii dans un HTC Vive, mais ces dispositifs plus coûteux sont destinés à la recherche, et absent des modèles grand public à l'heure où ce mémoire est rédigé.

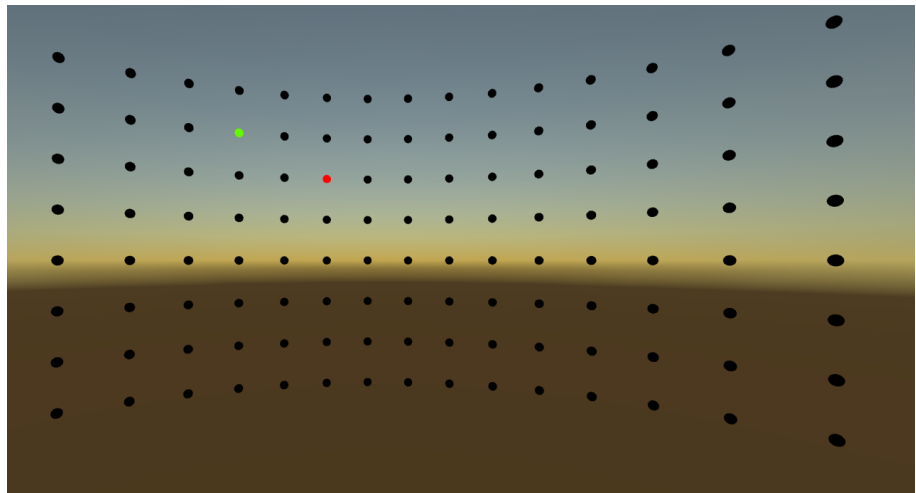
sans casque de réalité virtuelle montrent que la direction de la tête et du regard ne sont pas les mêmes [Fridman et al.(2015b)] et qu'il est possible d'estimer la direction du regard d'un automobiliste en fonction de la direction de sa tête [Fridman et al.(2015a)].

Pour observer cette différence, nous avons demandé à 24 participants (principalement des étudiants en licence d'informatique) de fixer leur regard sur des cibles affichées dans un monde virtuel en étant assis sur une chaise. La figure 3.3 montre le dispositif et la figure 3.4 illustre ce que chaque participant voit dans le casque de VR. La consigne stipulait que chaque cible observée soit validée par une pression sur la barre d'espace du clavier, ce qui permettait de collecter des données temporelles, permettant d'évaluer la rapidité d'acquisition visuelle de la cible. La précision ne peut pas être mesurée par contre car aucune information (autre que la bonne volonté du sujet) ne permet de déterminer si il regarde bien la cible au moment de la validation.

FIGURE 3.3 – *Dispositif d'expérimentation de la relation tête-regard (montage réalisé a posteriori). Chaque participant effectue le test en position assise, sur un chaise non pivotante, et avec les doigts sur la barre d'espace pour valider les actions du test sans perdre de temps.*



FIGURE 3.4 – *Expérimentation permettant de déterminer la différence entre la direction de la tête et celle du regard avec un casque de réalité virtuelle*



Les données recueillies sont présentées dans le graphique de la figure 3.5. Il quantifie graphiquement la différence moyenne (vecteur) et l'écart type (ellipse) entre la direction du casque lors de l'appui du bouton et la direction de la cible regardée (i.e. "visée") par l'utilisateur. Ce graphique met en évidence une différence notable entre la direction du regard et celle de la tête lorsque le participant doit tourner la tête pour regarder la cible.

Cela s'explique par le fait que seule une partie du mouvement est effectuée avec la tête et l'autre partie est effectuée en tournant les yeux. L'exploitation de ces données nous a permis d'établir une équation simple interpolant la probable direction du regard sur la base de la direction mesurée du casque (i.e. de la tête).

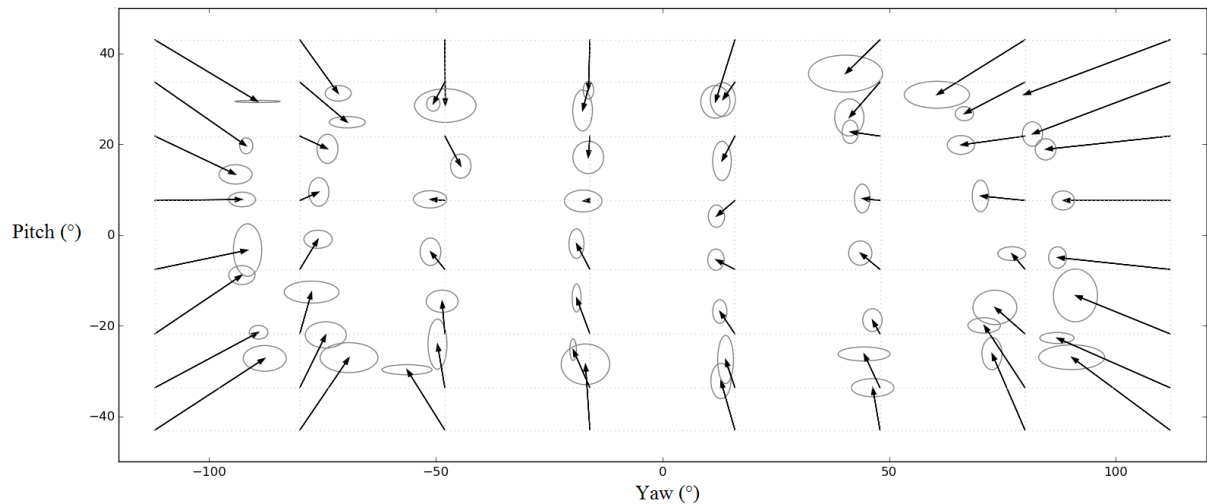


FIGURE 3.5 – Jeu de données recueilli : les vecteurs représentent la différence entre la direction de l'objet visé et la direction de la tête. Les ellipses représentent graphiquement les écarts-types.

Bien que l'étude réalisée ne se soit intéressée qu'aux données statiques – la direction de la tête au moment de la validation – la prise en compte du mouvement ou de l'intention du mouvement sur les secondes ou millisecondes précédant la validation pourrait sans doute permettre d'améliorer le modèle.

(b) Évaluation de la sélection au regard

Les résultats de l'expérience précédente nous permettent de réaliser une approximation de la direction du regard d'un utilisateur assis en fonction de la direction de sa tête. Nous nous sommes intéressés à l'utilisation de cette relation dans le cadre d'une méthode de sélection par lancer de rayon et l'avons comparée à la méthode standard de sélection au casque avec le viseur dans le prolongement de la direction du casque. Le protocole est présenté dans la figure 3.6 : il met en œuvre une série de cibles que le participant doit viser du regard et sélectionner en appuyant sur la touche espace. Le dispositif est strictement identique à celui de l'expérience précédente, présenté dans la figure 3.3. Les participants savaient où ils visaient grâce à un réticule de visée affiché à l'écran. La consigne de l'expérimentation consistait à passer de cible en cible le plus rapidement et précisément possible. Pendant qu'il visait une cible (colorée en vert), chaque participant

était prévenu de la cible suivante (colorée en rouge). L'ordre de sélection des cibles est conforme à celui préconisé dans [Soukoreff & MacKenzie(2004)].

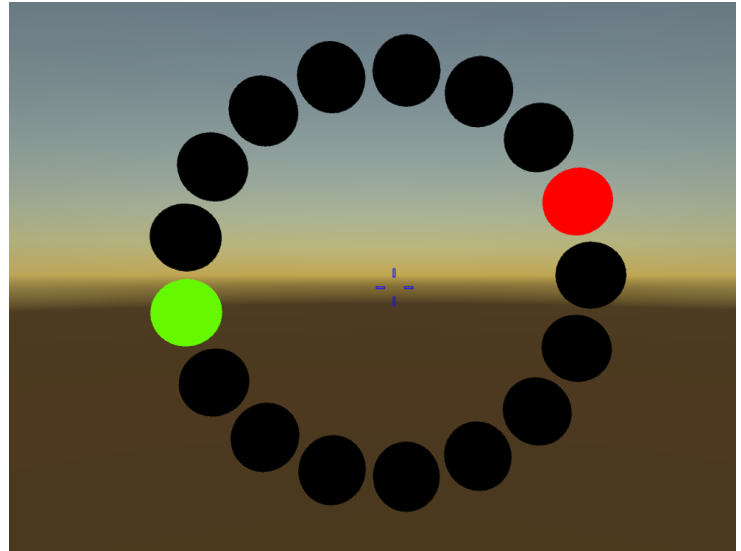


FIGURE 3.6 – *Expérimentation permettant de déterminer la performance de la sélection au regard avec un casque de réalité virtuelle (loi de Fitts). L'utilisateur doit viser des cibles qui alternent de manière aléatoire autour d'un cercle. La cible courante est colorée en vert, la cible suivante en rouge.*

Dans un premier temps, il a été demandé aux participants de noter entre 0 et 100 la difficulté ressentie pour réaliser la tâche demandée (viser les cibles) pour les deux méthodes de sélection. Ces notes, subjectives, ne sont pas comparables entre les participants mais permettent de déterminer quelle méthode de sélection a paru la plus simple pour chacun d'entre eux. Il apparaît que la moitié des participants (12) ont trouvé que la difficulté de la tâche était la même quelle que soit la méthode de sélection. Et que parmi ceux ayant trouvé une différence, 9 ont trouvé que la méthode estimant la direction du regard était plus facile d'utilisation que la méthode standard contre 3 seulement ayant trouvé la méthode standard plus simple. De plus, l'ordre dans lequel les participants ont découvert ces techniques a été un facteur important dans leur réponse à cette question : les 3 participants ayant trouvé la sélection plus simple sans aide avaient déjà acquis de l'expérience en passant en premier le test avec aide.

Pour le calcul du *throughput*, nous avons utilisé la méthode préconisée dans [Soukoreff & MacKenzie(2004)] et les indices de difficulté ont été ajustés en fonction de la précision effective des participants. La figure 3.7 montre la régression linéaire pour les deux méthodes étudiées. Les coefficients de détermination sont trop faibles pour leur donner un réel pouvoir prédictif (R^2 de 0.64 pour notre méthode de sélection et de 0.7 pour la méthode standard). Cependant, on observe un *throughput* de 2.66 pour notre méthode de sélection et de 2.54 pour la méthode standard. Un *throughput* plus grand signifiant une meilleure performance du point de vue de la précision et de la rapidité, ces valeurs semblent aller dans le même sens que les données subjectives données par les participants.

(c) Albi vu d'en haut

Un dernier prototype pour la sélection au regard a été réalisé en partenariat avec le Centre National de Création Musicale Albi-Tarn (GMEA) et est décrit dans [Muller et al.(2016)]. Ce démonstrateur (figure 3.8) à été présenté au public lors des Journées

FIGURE 3.7 – *Interpolation linéaire de la relation entre durée du mouvement et indice de difficulté (MT : Durée du mouvement, ID : Indice de Difficulté). En rouge, l'interpolation pour la méthode de sélection utilisant notre estimation de la direction du regard, en bleu la méthode standard. Le throughput est l'inverse de la pente obtenue par cette régression linéaire.*

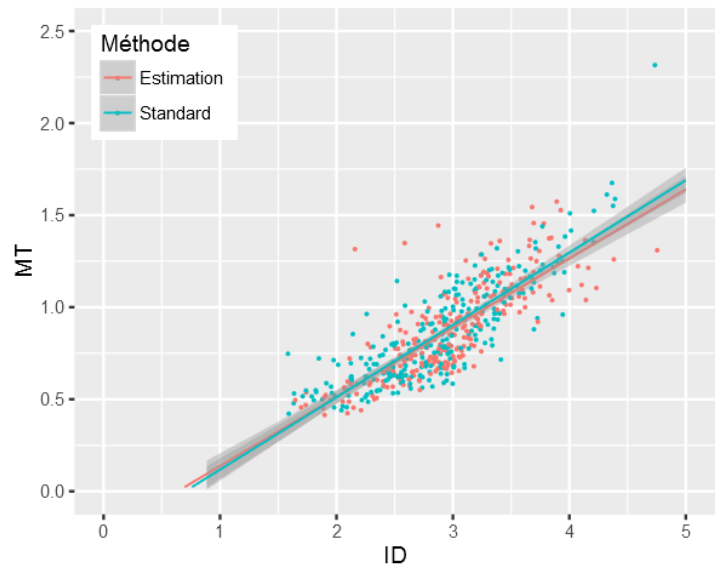


FIGURE 3.8 – *Albi vu d'en haut*

d'Informatique Musicale⁶ où il a été utilisé intuitivement de manière satisfaisante par les utilisateurs pour explorer des paysages sonores de la ville.

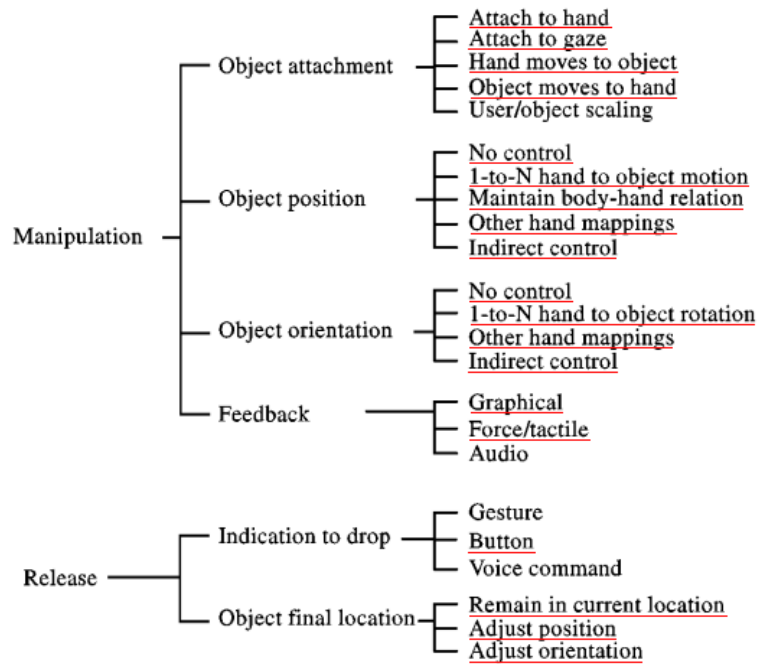
Dans le cadre des EVI à visée pédagogique, et même de façon plus générale, le calcul du *throughput* d'une méthode de sélection permet de faire des comparaisons simples mais semble insuffisant pour discriminer entre les différentes méthodes de sélection qui, comme nous le verrons dans la partie suivante, s'inscrivent généralement dans des méthodes de sélection-manipulation.

3.3 Manipulation

La manipulation est l'étape suivant la sélection d'un objet ; elle consiste à agir sur l'EVI à l'aide des périphériques d'entrée, par exemple déplacer un objet, utiliser un cla-

6. http://www.gmea.net/ancien_site/Albi-d-en-haut

FIGURE 3.9 – Taxonomie des méthodes de manipulation [Bowman(1999)]. Les éléments soulignés en rouge sont les éléments que nous avons implémentés et qui nous ont permis d’acquérir une expérience concrète des possibilités et des limites de ces éléments.



vier virtuel, appuyer sur un bouton pour lancer une procédure ou même manipuler une information.

Dans le monde réel nous utilisons nos mains pour la quasi-totalité de nos interactions. Naturellement la méthode principale pour interagir dans un EVI est donc aussi la manipulation avec les mains, même si la voix, le regard et d’autres parties du corps peuvent aussi être utilisées. De même que pour les méthodes de sélection, les méthodes d’interaction peuvent être catégorisées en deux grandes familles : celles qui reposent sur l’utilisation d’un lancer de rayon (qui correspondent à pointer un objet) et celles qui reposent sur l’utilisation d’une main virtuelle (qui correspondent à attraper un objet).

[Poupyrev & Ichikawa(1999)] proposent deux grandes catégories pour la manipulation dans des mondes virtuels : la manipulation égocentrique, lorsque l’utilisateur a un point de vue à la première personne et interagit avec le monde virtuel depuis l’intérieur, et la manipulation exocentrique lorsque l’utilisateur interagit avec le monde virtuel depuis l’extérieur. Cette deuxième forme de manipulation n’a que peu été étudiée probablement. Sans doute une des raisons est qu’en RV, le point de vue égocentrique est préféré car il favorise hypothétiquement une meilleure immersion.

Lors de la création d’un EVI, il est possible d’en imaginer un modèle physique réaliste où l’utilisateur interagirait avec les objets au travers du moteur physique (par exemple des boutons qui s’enfoncent en réaction à une collision avec la main virtuelle). En pratique ce genre de système est compliqué dans sa mise en œuvre ainsi que dans son utilisation, en raison du manque de retour haptique des objets avec lesquels l’utilisateur interagit. Les “smart objects” [Kallmann & Thalmann(1999)] représentent une alternative classique dans laquelle les objets 3D interactifs exhibent leurs propriétés interactionnelles.

Ces affordances, qui sont traditionnellement représentées par des étiquettes texte ou des icônes pourraient prendre la forme d'outils métaphoriques remplaçant contextuellement la main virtuelle de l'utilisateur (à la manière du curseur dans les interfaces graphiques 2D).

[Poupyrev et al.(1997)] proposent un cadre conceptuel pour l'étude des techniques de manipulation en RV. Ils ont identifié cinq types d'opérations de manipulation élémentaire qui, combinées, peuvent former n'importe quelle méthode d'interaction :

- Positionnement
- Orientation
- Sélection
- Entrée de texte
- Entrée de nombres

Dans notre cas particulier – la formation à l'utilisation d'une machine outil – nous avons exclu de nos investigations l'entrée directe de texte ou de nombres. En effet, il ne nous semble que peu pertinent d'utiliser un environnement virtuel immersif pour faire du traitement de texte ; en conséquence l'introduction d'interactions spécifiques pour cet objectif ne nous a pas semblé nécessaire. À cela s'ajoute le fait que dans les rares cas spécifiques où la saisie de texte est nécessaire, des méthodes d'interactions plus communes peuvent être utilisées (par exemple un clavier virtuel avec des boutons pour du texte ou des "potentiomètres" pour des nombres).

3.3.1 Problématiques

L'un des principaux problèmes de la manipulation en RV, particulièrement avec des périphériques d'entrée comme le *Leap Motion* laissant les mains complètement libres, est l'absence de retour haptique, qui rend parfois certaines tâches de précision difficiles à réaliser. Il est cependant possible d'utiliser des techniques visio-haptiques reposant sur un rapport contrôle / affichage inférieur à 1 comme celles proposées pour l'animation d'avatar à partir de systèmes de capture de mouvements dans [Jauregui et al.(2014)] afin de rediriger la position des mains virtuelles. Ces techniques, en plus de fournir une sensation pseudo-haptique à l'utilisateur permettent de réduire l'amplitude des mouvements dans la simulation par rapport à ceux du monde réel permettant, a priori, plus de précision pour les tâches de manipulation.

3.3.2 Évaluation

Une autre problématique importante est l'évaluation des méthodes d'interaction. Divers indicateurs sont proposés dans [Poupyrev et al.(1997)].

Temps de complétion Pour une opération de sélection cela correspond au temps entre le stimuli demandant à l'utilisateur de sélectionner un objet et le moment où l'objet est correctement sélectionné. Pour des opérations de positionnement et/ou d'orientation, cela correspond au temps mesuré entre le déclencheur de sélection et le moment où l'objet est positionné avec la précision requise.

Précision La proximité entre la position et l'orientation désirée, et celle de l'objet placé par l'utilisateur.

Taux d'erreur Le nombre de tentatives échouées pour accomplir la tâche demandée. Dans le cas du positionnement et de l'orientation, cela peut être le nombre d'itérations nécessaires pour arriver à effectuer la tâche demandée avec la précision requise.

Facilité d'utilisation La charge cognitive pendant l'utilisation de la technique. Elle peut se mesurer soit directement par électroencéphalographie, soit indirectement en demandant à l'utilisateur d'effectuer en parallèle d'autres tâches cognitivement intensives.

Facilité d'apprentissage La capacité des utilisateurs à s'améliorer avec de l'expérience.

Sentiment de présence La sensation d'immersion et de conscience de l'espace (*spatial awareness* en anglais)

Des techniques permettant d'évaluer séparément ces différents points ont été proposées par la littérature [Foley et al.(1984), Whitfield(1989), Grissom et al.(1993)].

3.3.3 Les méthodes de sélection-manipulation utilisées dans le jeu vidéo

The Lab [Valve(2016)] et *Oculus First Contact* [Oculus(2016)] ont été inspirants car ils ont tous les deux été créés avec la contrainte d'être utilisés par des utilisateurs découvrant la réalité virtuelle pour la première fois. En outre, il visent aussi à présenter aux utilisateurs l'utilisation des contrôleurs.

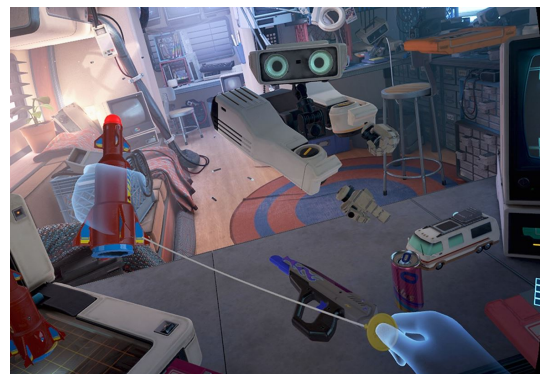
Ces deux jeux ainsi que tous les autres cités dans 3.1.3 utilisent intensivement la métaphore de la main virtuelle grâce à laquelle le joueur peut interagir avec le monde virtuel en utilisant les contrôleurs représentés en fonction des cas comme des outils, des mains, ou simplement avec leur forme dans le monde réel.

Dans *The Lab*, le joueur commence avec une représentation fidèle des contrôleurs dans la main. Les boutons sur ces contrôleurs sont dynamiques et s'enfoncent dans le monde virtuel lors des actions de l'utilisateur dans le monde réel. Cette représentation reste celle par défaut lorsque l'utilisateur n'a rien dans les mains. Elle permet aux développeurs de montrer au joueur les boutons à utiliser pour les interactions pendant la phase de découverte de l'application en les mettant en évidence (changement de couleur, clignotement, etc). Au travers des différentes expériences proposées dans le jeu, le joueur peut ramasser divers objets avec la manette. Par exemple, dans la première expérience proposée, il est possible de ramasser un bout de bois pour jouer avec un chiot robotique virtuel. Pour ce faire, il faut placer la manette en contact avec le morceau de bois et maintenir la gâchette appuyée pour le garder en main. Pendant que le bâton est dans la main de l'utilisateur, il remplace visuellement l'affichage de la manette qui ne réapparaît qu'une fois l'interaction finie. Il est possible de le lancer en faisant un mouvement rapide

et en relâchant la gâchette au bon moment, la physique du jeu reprenant effet sur le bâton au moment du relâchement en conservant la vitesse qui lui a été induite par le mouvement. *The Lab* propose d'autres mini-jeux où le fonctionnement est similaire à quelques différences près. Par exemple pour le jeu de tir à l'arc, l'utilisateur ramasse l'arc posé le long des créneaux mais n'est pas obligé de maintenir la gâchette appuyée pour le garder en main. Ramasser l'arc transforme son autre "main" en flèche qui pourra être encochée dans l'arc. La gâchette devra être maintenue le temps de viser et bander l'arc, avant d'être relâchée pour décocher la flèche.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 3.10 – Captures d'écran d'Oculus First Contact [*Oculus(2016)*]

Oculus First Contact explore une approche différente en proposant à l'utilisateur des mains virtuelles dont les animations sont contrôlées grâce aux contrôleurs *Oculus Touch* qui permettent un contrôle plus fin de la pose des mains virtuelles (contrôle du pouce, de l'index et des trois autres doigts regroupés ayant chacun 3 positions possible – voir figure 3.10 pour des exemples). Aucune aide n'est donnée à l'utilisateur et l'application est un bac à sable dans lequel l'utilisateur joue et découvre de façon ludique comment se servir des manettes. En pratique, comme précisé dans la section 5.2.1, nous avons fait tester cette application à une vingtaine de participants pendant des expérimentations et tous ont réussi à prendre l'application en main au bout de quelques minutes. En effet les contrôles sont naturels (la pose des mains dans l'application correspond à peu près à celle dans

le monde réel) et l'expérience utilisateur proposée est très ludique : l'utilisateur s'amuse avec différents objets (fusées de carnaval, pistolet laser, papillons, ...) qu'il imprime en insérant des disquettes dans une imprimante 3D futuriste. La seule aide disponible est fournie à l'utilisateur sous forme d'info-bulles attachées à des objets, et montrant ce qu'il faut en faire ainsi que la pose à adopter pour pouvoir le faire (par exemple la figure 3.10(d) montre qu'il faut insérer la disquette mais détaille aussi la pose permettant de l'attraper).

3.3.4 Prototypes et retours d'expérience

(a) Pont roulant

Un prototype permettant de contrôler un pont roulant à l'aide du *Leap Motion* à été réalisé afin d'expérimenter avec des "menus flottants" (voir figure 3.11). Cette interface, s'inspirant de la télécommande traditionnellement utilisée pour piloter ce type de dispositif est une interface "physicalisée" ou l'appui sur les boutons est contrôlé par le moteur physique de *Unity* (le moteur de jeu utilisé). Les boutons s'appuient donc par contact avec les *colliders* de la main virtuelle contrôlée par le *Leap Motion* et déclenchent l'action associée une fois qu'ils sont suffisamment enfoncés. Deux modes ont été proposés : dans le premier, le menu flotte librement et dans le second, il est "attaché" à la main de l'utilisateur.



FIGURE 3.11 – *Prototype de pont roulant contrôlé à l'aide d'un Leap Motion*

(a) Interface flottante

(b) Interface liée à la main

Si ce prototype n'a pas donné lieu à des expérimentations formelles, nous avons tout de même collecté de précieux retours d'expérience. Tout d'abord, lors de l'utilisation d'une interface basée sur de la reconnaissance d'image (ici le *Leap Motion*), il est nécessaire d'éviter de provoquer l'occlusion des objets suivis (ici les mains). En effet, dans les premières itérations du prototype nous avons tenté de mettre la télécommande dans la main de l'utilisateur (et non à côté comme dans la figure 3.11(b)). Il était alors nécessaire de placer une main au dessus de l'autre pour pouvoir appuyer sur les boutons de la télécommande ce qui avait pour effet de provoquer la perte du suivi des mains par le *Leap Motion* qui ne reconnaissait plus la main du dessous (celle tenant la télécommande). Ce problème technique a pu être résolu en mettant la télécommande sur le côté et non au centre de la paume de l'utilisateur. De plus, ces interactions "physicalisées" ont posé un problème communément appelé *Midas Touch* où la plupart des utilisateurs se appuyaient sur des

boutons par erreur, soit dans des mouvements involontaires, soit lorsque la pose de la main était mal détectée par le *Leap Motion*.

(b) Réglage d'une contre-pointe

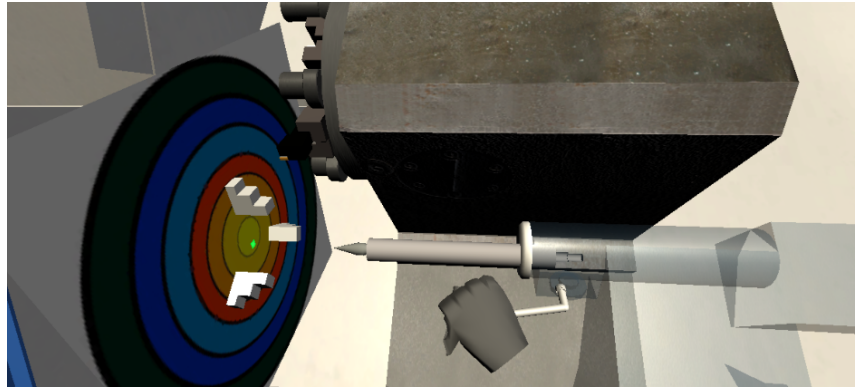


FIGURE 3.12 – Prototype d'une méthode d'interaction permettant le réglage d'une contre-pointe

Dans ce prototype, nous avons utilisé le *Leap Motion* pour permettre le réglage d'une contre-pointe virtuelle. Dans le monde réel, ce réglage se fait en vissant/dévisant trois vis à l'aide d'une clé Allen et l'objectif est d'aligner la contre-pointe avec l'axe des mors (et donc viser le centre de la cible dans la figure 3.12).

Pour ce prototype, l'interaction proposée consiste donc à prendre la clé Allen posée sur une table à côté de la machine-outil. La clé s'attache à la paume de la main lorsqu'elle entre en contact avec une main fermée. Une fois la clé attrapée, il est possible de l'attacher à une vis par contact. La position de la clé est alors fixée et son orientation est dirigée par la position de la main ce qui permet de visser ou dévisser la vis. Une fois que l'utilisateur a fini d'interagir avec cette vis, il peut alors retirer la clé en éloignant suffisamment sa main pour que la clé se détache de la vis. L'interaction se finit quand l'utilisateur ouvre la main. Si la clé n'est pas attachée à une vis, elle tombe (ou est projetée en fonction du mouvement induit avant relâchement). Si elle est attachée à une vis, elle ne bouge pas et l'utilisateur peut reprendre son opération si nécessaire.

Cette implémentation naïve de l'opération de vissage nous a permis de découvrir et de comprendre certaines des problématiques mentionnées dans la littérature. La première est "l'effet Heisenberg" proposé dans [Bowman et al.(2001a)] qui correspond au fait de modifier involontairement le réglage effectué lors de sa validation. Dans notre cas, pour valider le réglage il fallait désengager la clé ce qui faisait inévitablement tourner la vis par la même occasion.

De plus ces expérimentations nous ont permis de conclure que, si la technologie du *Leap Motion* semble intéressante et est utilisable dans des prototypes, elle n'est pas forcément encore assez mûre pour être utilisée en production car une partie non négligeable du temps d'apprentissage des interactions avec le monde virtuel est dédiée à la compréhension des limites du dispositif (problèmes d'occlusions qui font que la main n'est pas reconnue dans la position ou elle est, perte du suivi de la main lorsqu'elle sort du champ de vision du dispositif, apprentissage des gestes).

Finalement, si ce dernier prototype n'a pas été conservé, il nous a aidé à mieux comprendre les différents problèmes liés à la tâche de vissage et nous a convaincu de l'intérêt de transformer la main virtuelle pour les manipulations demandant l'utilisation d'un outil. Cela a donné lieu à l'interaction finale décrite dans la partie 4.3.3 qui est utilisée dans Meca3D.

3.4 La navigation

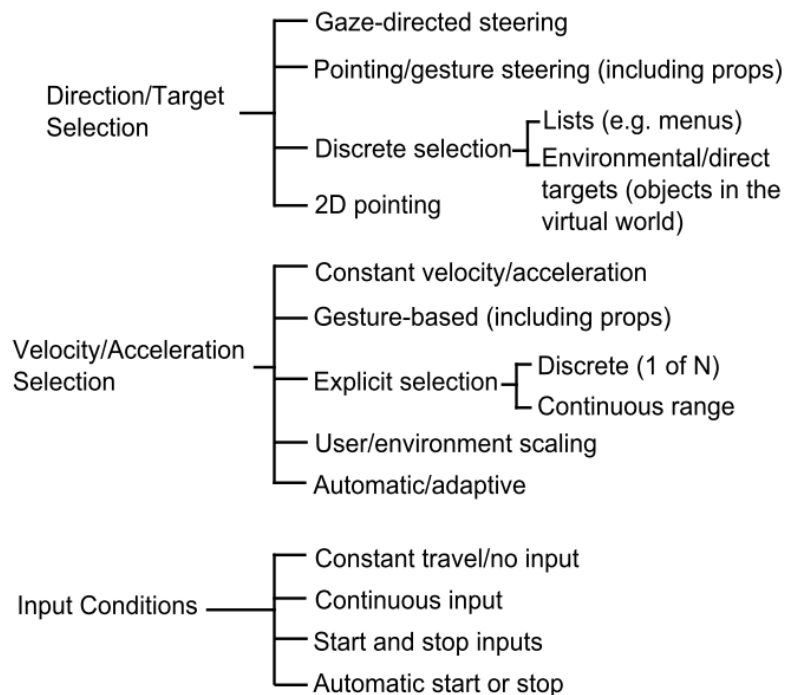


FIGURE 3.13 – *Taxonomie des méthodes de déplacement [Bowman(1999)]*

Dernière grande famille de méthodes d'interaction dans la catégorisation de Bowman, la navigation correspond à la capacité de l'utilisateur à contrôler son point de vue. [Bowman et al.(1999)] proposent une décomposition de l'opération de navigation en deux étapes : la planification qui correspond au processus cognitif durant lequel l'utilisateur planifie les modalités de son déplacement et la phase de déplacement durant laquelle l'utilisateur effectue le mouvement qu'il a planifié. Affranchi des contraintes du monde réel, cette deuxième phase peut s'effectuer de multiples façons dans un espace virtuel. [Boletsis(2017)] en identifie 11, du déplacement classique utilisant les flèches du clavier ou une manette de jeu, à des alternatives plus immersives. La plus proche⁷ de la réalité considère un utilisateur se déplaçant "librement" dans un espace contraint tout en étant localisé en temps réel par un système de suivi. L'espace virtuel peut être beaucoup plus vaste que l'espace réel grâce à l'utilisation d'un tapis roulant (éventuellement multidirectionnel) ou plus habilement par le truchement de techniques de redirection ou de réorientation

7. On n'emploiera pas l'adjectif "naturel" qui relève dans ce contexte d'une appréciation subjective du déplacement par l'utilisateur.

dynamique [Nescher et al.(2014)]. Le déplacement peut également être “simulé” par l'utilisateur en balançant ses bras par exemple [Wilson et al.(2016)] ou en se penchant en avant lorsqu'il souhaite avancer [Harris et al.(2014)]. Enfin, la téléportation est techniquement la plus simple à mettre en œuvre mais cette technique dite “non continue” n'est pas exempte de défauts (cf. section 3.4.4).

3.4.1 Problématiques

Comme précisé dans la partie 3.1.2, l'un des principaux problèmes du déplacement en réalité virtuelle est le mal du simulateur visuellement-induit.

Une autre problématique récurrente énoncée dans [Bowman(1999)] est la désorientation ou la perte de repère qui peuvent être engendrées par des méthodes de déplacement complexes comme par exemple la téléportation qui fait perdre à l'utilisateur ses repères au moment où elle intervient.

Dans le cas des applications à visée pédagogique, avec des contextes d'application où des apprenants doivent utiliser l'application pour acquérir un savoir, il nous semble primordial d'être particulièrement vigilant quant au mal du simulateur visuellement induit. En effet, l'objectif principal n'étant pas le jeu, et l'apprentissage nécessitant une utilisation prolongée et régulière, il nous semble impératif que toute application produite dans ce contexte soit conçue afin de minimiser cet aspect néfaste qui pourrait empêcher à des utilisateurs potentiels d'utiliser l'application.

3.4.2 Le déplacement dans les jeux vidéo

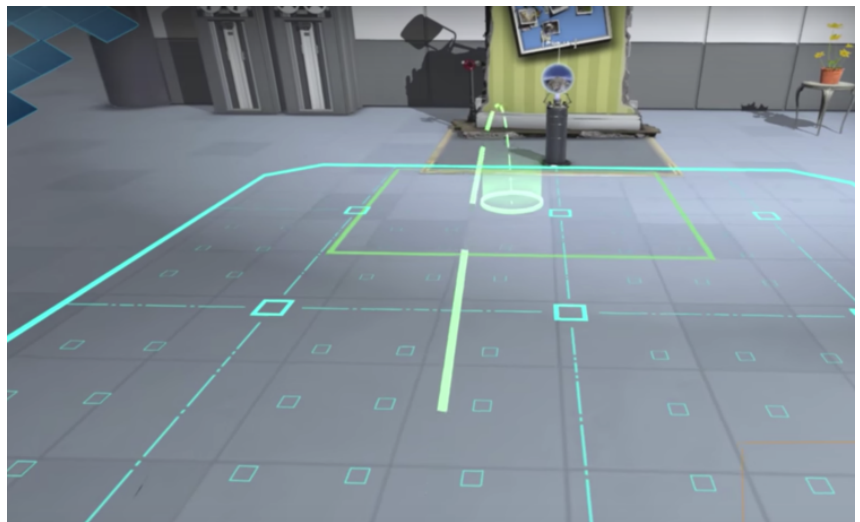


FIGURE 3.14 –
Téléportation à l'aide
d'un rayon courbe dans
The Lab [Valve(2016)]

Dans *Fantastic Contraptions* [Northway Games and Radial Games(2016)], *Oculus First Contact* [Oculus(2016)] et *Soundstage* [Hard Light Labs(2017)], les déplacements sont limités au déplacement “naturel” dans l'espace de suivi du casque et aucune interaction n'est prévue pour permettre à l'utilisateur d'en sortir. Dans *The Lab* [Valve(2016)] et *The Gallery Call of the Starseed* [Cloudhead Games(2016)], l'utilisateur peut utiliser un système de téléportation. Le système affiche un rayon courbe partant du contrôleur

lors de l'appui sur le bouton déclencheur puis téléporte l'utilisateur à l'endroit sélectionné par le rayon lorsque le déclencheur est relâché (voir Fig. 3.14). Cette méthode, bien que demandant un petit temps d'apprentissage, présente l'avantage de permettre la conservation de la conscience spatiale de l'utilisateur et de ne pas générer de cinétose, justifiant son choix dans la première génération de jeux en réalité virtuelle.

3.4.3 Évaluation

Une autre problématique importante est l'évaluation de ces méthodes de déplacement. Les indicateurs suivant sont proposés dans [Bowman(1999)] :

Temps de complétion Le temps nécessaire pour effectuer l'opération de navigation.

Précision La proximité entre position et orientation désirées et obtenues.

Perception de l'espace (*spatial awareness* en anglais) la capacité de l'utilisateur à se localiser dans le monde pendant et après le déplacement.

Facilité d'utilisation La charge cognitive pendant l'utilisation de la technique. Elle peut se mesurer soit directement par électroencéphalographie, soit indirectement en demandant à l'utilisateur de se rappeler d'éléments clés de l'environnement comme des formes ou des couleurs.

Facilité d'apprentissage La capacité des utilisateurs à s'améliorer avec de l'expérience.

Récolte d'information La facilité avec laquelle un utilisateur peut récolter des informations pendant la navigation.

Sentiment de présence le sentiment d'être immergé ou d'être à l'intérieur de l'environnement pendant le déplacement

Confort Absence de mal du simulateur

Certaines de ces métriques comme le temps de complétion et la précision sont faciles à mesurer mais ne sont pas forcément les plus pertinentes pour déterminer quelle méthode de navigation utiliser. Les autres, subjectives par nature, sont plus complexes à évaluer et reposent généralement sur des questionnaires d'expérience utilisateur.

3.4.4 Prototypes et retours d'expérience

(a) Méthodes de déplacement par points d'intérêt

Nous avons dans un premier temps testé différentes méthodes de déplacement utilisant des points d'intérêt, représentés graphiquement par des sphères placées en hauteur afin de permettre à l'utilisateur de les sélectionner de loin. Dans notre cas, les points d'intérêt correspondent aux différents postes de travail de l'atelier virtuel et intègrent des informations de position et de direction qui seront précisément celles de l'utilisateur une fois le mouvement réalisé.

Nous avons testé trois méthodes de déplacement pour lesquelles la sélection de ces sphères se fait en utilisant un viseur placé dans la direction donnée par le casque de RV :



FIGURE 3.15 – Vue d’ensemble de la scène et ses points d’intérêt.

La téléportation qui transfère instantanément l’utilisateur dans la position et l’orientation données par le point d’intérêt. Cette méthode est très efficace (temps, précision) et ne provoque pas de mal du simulateur. Cependant, cette instantanéité a tendance à fortement désorienter l’utilisateur qui doit généralement prendre quelques instants pour actualiser son schéma mental du monde qui l’entoure.

Le suivi d’un chemin généré algorithmiquement par le moteur de jeu. Cette méthode, proposée pour palier à la désorientation associée à la téléportation, déplace l’utilisateur en lui faisant parcourir un chemin qui évite les machines de l’atelier et l’amène dans la position et l’orientation du point d’intérêt visé (de la même façon qu’un personnage non joueur se déplacerait). Cette méthode pose des problèmes de cinétose car l’utilisateur i) se déplace dans une direction qui n’est pas toujours celle dans laquelle il regarde et ii) ne contrôle aucun aspect du déplacement.

La projection qui transporte l’utilisateur en ligne droite au travers des objets de la scène pour l’amener au point d’intérêt. Cette méthode est un intermédiaire entre le suivi de chemin et la téléportation. Elle présente l’avantage de ne pas trop désorienter l’utilisateur ni de provoquer trop de cinétose tant que l’utilisateur ne tourne pas la tête après avoir sélectionné le point d’intérêt auquel il souhaite aller.

Ces trois prototypes nous ont permis d’expérimenter avec les différentes alternatives proposées dans la littérature pour le déplacement utilisant des points d’intérêt. Nous avons fait l’expérience des problèmes liés à la cinétose, et en avons retenu deux grands principes. Premièrement, il est important que le mouvement s’effectue dans la direction du regard de l’utilisateur, pour des raisons similaires au fait qu’il faut regarder la route au travers du pare-brise plutôt que le paysage au travers de la fenêtre lorsque l’on est sensible au mal des transports. Deuxièmement, il faut éviter de changer l’orientation du point de vue de l’utilisateur dans une animation “continue” et il est grandement préférable de le changer en une seule fois même si cela génère de la désorientation.

Finalement, nous avons utilisé les systèmes mis en place pour proposer une dernière méthode de déplacement, s’inspirant du concept de “world-in-miniature”, permettant à l’utilisateur de se téléporter aux points d’intérêts à l’aide d’une carte interactive en sélectionnant les points d’intérêts à l’aide du *Leap Motion* (voir figure 3.16).

Ce mode de déplacement fonctionne bien et provoque moins de désorientation que la téléportation précédente car, si le monde change autour de l’utilisateur, la carte est un élément fixe du champ de vision de l’utilisateur.

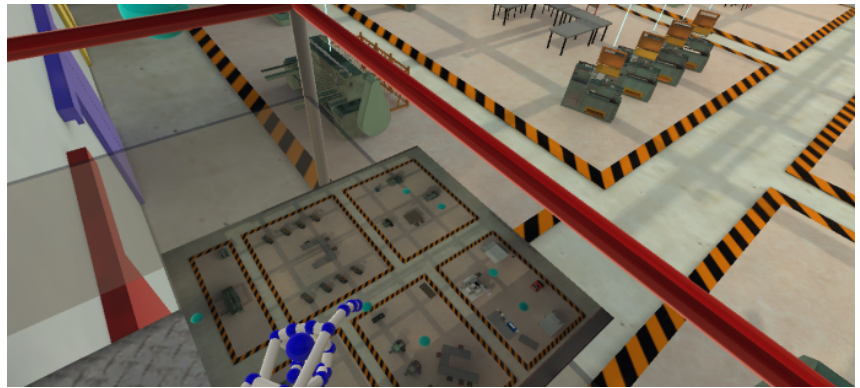


FIGURE 3.16 – *Carte interactive des points d'intérêts*

(b) La méthode “Segway”

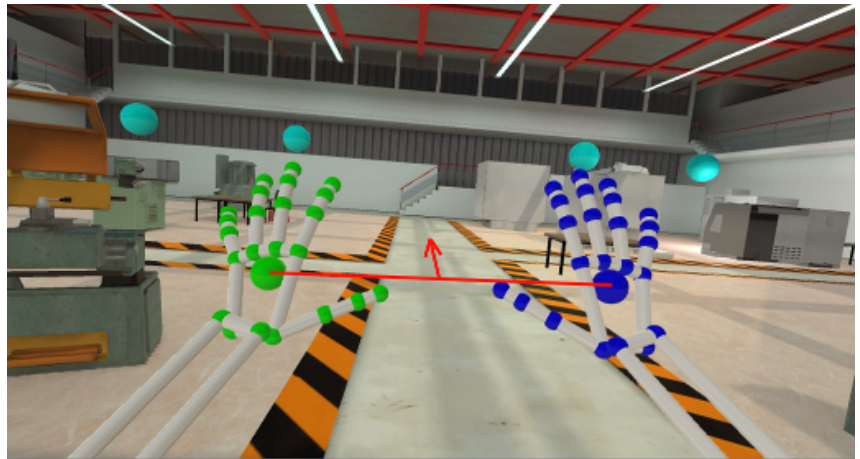


FIGURE 3.17 – *Méthode de déplacement “Segway”, le vecteur vitesse est perpendiculaire à la droite entre les paumes de l'utilisateur*

La méthode du “Segway” repose sur l'utilisation du *Leap Motion* pour le contrôle du mouvement. Pour se déplacer, l'utilisateur place ses deux mains devant lui puis les éloigne ou les rapproche de son corps pour, respectivement, avancer ou reculer. Il est aussi possible de tourner en utilisant ses mains comme un guidon, en ayant la main gauche plus éloignée que la main droite, il tournera vers la droite. Plus précisément, la vitesse de l'utilisateur est proportionnelle à la distance entre ses mains et la zone d'équilibre (où il est à l'arrêt) et la direction du vecteur vitesse est perpendiculaire à la droite reliant les deux paumes de l'utilisateur (voir figure 3.17).

Cette méthode a été expérimentée avec des étudiants de lycée technique à Barcelone qui devaient utiliser cette méthode pour explorer l'atelier virtuel et trouver des objets en un minimum de temps possible. Nous leurs avons ensuite demandé s'ils avaient ressenti du mal du simulateur. Si les étudiants ont réussi à utiliser la méthode de déplacement sans problème, et ont apprécié l'expérience, la plupart d'entre eux ont rapporté divers symptômes de mal du simulateur malgré un temps d'exposition faible (entre 2 et 4 minutes en fonction de la rapidité de complétion de l'activité).

Lors de cet événement, nous avons identifié deux problèmes que nous pensons être à l'origine de la cinétose ressentie : la marche arrière et la capacité à tourner. En effet, ces deux actions provoquent des déplacements dans des directions différentes à celle du

point de vue de l'utilisateur et leur tendance à provoquer de la cinétose n'avait pas été pleinement anticipée durant la phase de développement. Cela est dû au fait que les tests ont été réalisés en utilisant cette méthode de déplacement avec les mains dans la direction du regard et en tournant le buste (avec les mains) pour changer de direction ce qui n'est pas la façon dont elle a été utilisée par les utilisateurs n'ayant aucune expérience préalable.

Nous pensons donc qu'il pourrait être intéressant d'aller plus loin en menant de vraies expérimentations avec une version améliorée de la méthode ne proposant que le déplacement dans la direction donnée par la tête de l'utilisateur et en intégrant la technique du *tunelling*. Cette nouvelle méthode respecterait les points suivants que nous avons identifiés comme permettant de minimiser la cinétose provoquée par une méthode de déplacement :

- Un point fixe au centre la vision (les mains de l'utilisateur)
- Pas de mouvement dans la vision périphériques (grâce au *tunelling*)
- Un mouvement contrôlé directement par l'utilisateur
- Un mouvement dans la direction du point de vue de l'utilisateur

(c) Réduction du mal du simulateur à l'aide du *tunelling*

FIGURE 3.18 – La technique du *tunelling* consiste à flouter (image ci-contre) ou masquer la région correspondant à la vision périphérique lors du déplacement continu.



Dans le cadre de nos recherches sur la navigation en réalité virtuelle, nous avons implémenté la technique du *tunelling* afin d'évaluer son efficacité en vue d'un possible intégration dans Meca3D. Cette technique, qui vise à réduire la cinétose en minimisant les mouvements dans la vision périphérique de l'utilisateur, a montré sa capacité à réduire le mal du simulateur [Fernandes & Feiner(2016)]. Notre propre expérience d'utilisation de cette méthode reflète les résultats publiés et nous encourageons son utilisation dans toute application de RV dans laquelle est mis en œuvre un déplacement continu de l'utilisateur.

Il faut cependant noter que le *tunelling* ne fait que diminuer le mal du simulateur causé par le déplacement sans l'annuler complètement. Dans notre contexte, où les utilisateurs seront incités à utiliser l'application, sachant que les sensibilités peuvent varier fortement entre les individus, il nous semble préférable d'utiliser des méthodes de déplacement ne proposant aucune accélération afin d'éviter le conflit visuo-vestibulaire.



FIGURE 3.19 – Carrousel de machine-outils

(d) Une alternative au déplacement : un environnement intelligent

Finalement, nous avons également expérimenté une dernière méthode permettant d’éviter tout simplement le déplacement d’un point d’intérêt à un autre en permettant à l’utilisateur de faire venir à lui les objets dont il a besoin.

Dans le cas de l’atelier de génie mécanique de Meca3D, les points d’intérêts représentent des machines outils desquelles et vers lesquelles l’utilisateur se déplace. Nous proposons ici un changement de paradigme où un menu est mis à la disposition de l’utilisateur pour lui permettre de faire venir les machines à lui. L’image figure 3.19 présente une implémentation de ce concept dans laquelle les machines outils sont présentées en miniatures dans un carrousel que l’utilisateur peut manipuler grâce à deux boutons “suivant” et “précédent”, puis sélectionner celle qui viendra occuper son espace de travail.

Si cette méthode n’est pas à proprement parler une méthode de déplacement, elle est équivalente d’un point de vue fonctionnel à celles qui sont décrites dans la partie 3.4.4(a) tout en évitant les points négatifs qui y sont mentionnés.

Du point de vue de l’utilisateur, [Bowman et al.(2001b)] identifient trois intentions : *l’exploration* qui correspond à une navigation sans cible spécifique pendant laquelle l’utilisateur découvre l’environnement, *la recherche* qui implique de se déplacer vers une cible particulière et *la manœuvre* qui est précise, de courte portée, et permet de positionner son point de vue à un endroit plus avantageux avant d’effectuer une tâche particulière.

Dans notre cas spécifique de formation, l’exploration ne nous a pas semblé primordiale et nous avons donc décidé de nous en dispenser afin d’éviter d’avoir à utiliser des méthodes de déplacement provoquant le mal du simulateur. C’est la recherche dans notre contexte qui constitue le déplacement le plus important. Au lieu d’accorder la liberté à l’utilisateur de naviguer dans l’atelier de poste de travail en poste de travail, nous avons introduit une modalité alternative lui permettant de sélectionner et de changer le poste de travail en face de lui. Finalement, la manœuvre est une opération qui aurait pu se révéler problématique mais qui est en fait prise en charge par le matériel utilisé, qui gère naturellement les déplacements locaux de l’utilisateur dans une zone restreinte grâce à un système de *tracking*.

3.5 Conclusion

Nous avons vu que les interactions dans un EVI peuvent être catégorisées (sélection, manipulation, déplacement) et que pour chaque catégorie, plusieurs décennies de recherche sur les interfaces ont produit de nombreux critères d'évaluation et des bonnes pratiques pour leur conception. Cependant, [Bowman et al.(2006)] constataient il y a dix ans déjà que ces recherches, fragmentées par cette multiplicité de catégories et d'indicateurs, n'avaient pas permis d'aboutir sur un cadre consensuel guidant le choix des interactions dans un EVI. Ils avaient proposé une nouvelle direction dans les interfaces 3D, plaidant pour la conception d'applications spécifiques et avancées plutôt que des prototypes essayant de prouver leur supériorité dans un cadre théorique. C'est la direction que nous avons prise dans ce travail de recherche, où le prototype que nous livrons est évalué au niveau plus global de l'expérience utilisateur et des facteurs de succès des jeux d'apprentissages, par l'apport des méthodes d'évaluation des jeux sérieux et des EVI, plutôt que de se focaliser sur l'évaluation individuelle de chacune des interactions élémentaires qui le composent.

4

Meca3D

4.1 Introduction

Cette thèse se place à la genèse d'un projet nommé Meca3D dont l'objectif est de proposer une application immersive de formation au génie mécanique et, dans un premier temps, à l'utilisation de machines outils. Cette première version de Meca3D s'appuie sur les éléments discutés dans les chapitres précédents de ce manuscrit et a été utilisé dans des expérimentations permettant de valider la démarche employée ainsi que les choix réalisés.

L'axe principal qui a été étudié est la réalisation d'un atelier de génie mécanique virtuel permettant la formation à l'utilisation de machines outils. Dans ce chapitre nous commençons par nous intéresser au scénario proposé, puis aux métaphores d'interaction choisies dont nous décrivons succinctement l'implémentation avant de passer à la description des expérimentations qui ont eu lieu et aux résultats obtenus.

Les figures 4.1 et 4.2 montrent les deux tours intégrés à Meca3D ainsi que leurs capacités interactionnelles qui permettent l'usinage dans l'atelier virtuel.

4.2 Scénario proposé

Le scénario proposé s'articule suivant deux axes pédagogiques : l'apprentissage de procédures et la découverte d'une manipulation difficile à effectuer dans le cadre de travaux pratiques, à savoir le réglage de la contre-pointe d'un tour à commande numérique.

Cette opération a été choisie afin de rendre évidente l'utilité de la réalité virtuelle pour la formation à l'utilisation de machine-outils car c'est une opération à laquelle peu d'étudiants sont formés. En effet, cette opération de réglage d'un tour est très importante car elle conditionne le bon usinage des pièces. Cependant elle est à la fois longue à réaliser et à contrôler. Cela la rend difficile à apprendre à cause de la complexité de la relation entre les vis de réglages à manipuler et l'orientation de la contre-pointe.

Cela signifie que, dans un contexte réel de formation, un enseignant doit vérifier le bon réglage de la machine après une séance de travaux pratiques. Il doit ensuite s'occu-

FIGURE 4.1 – Capacités interactionnelles du tour conventionnel de Meca3D. En jaune, les objets ou éléments avec lesquels l'utilisateur peut interagir.



FIGURE 4.2 – Capacités interactionnelles du tour à commande numérique de Meca3D. En jaune, les objets ou éléments avec lesquels l'utilisateur peut interagir (trois vis présentes sur la poupée mobile supportant la contre-pointe sont utilisables mais non visibles, la poupée étant elle-même un objet avec lequel il est possible d'interagir).



per de remettre la machine en état de fonctionnement normal si le réglage fait par les étudiants n'est pas satisfaisant, afin que la machine reste disponible aux autres utilisateurs de l'atelier. Cette contrainte est forte dans une formation réelle car les enseignants n'ont simplement pas le temps nécessaire pour réaliser cette opération en cas d'échec des étudiants.

Le prototype proposé pour les expérimentations implémente un scénario plus vaste qui inclut l'utilisation de deux machines outils différentes : un tour conventionnel et un tour à commande numérique (CN) et demande à l'utilisateur de suivre un contrat de phase (voir annexe B) lui faisant utiliser le tour conventionnel (déjà réglé) pour effectuer une opération de chariotage-dressage avant de passer au tour CN qu'il faudra régler pour lancer un usinage pré-programmé.

Le parcours pédagogique se décompose en 7 activités :

- Introduction aux contrôles en réalité virtuelle
- Préparation du tour conventionnel
- Dressage de la pièce avec le tour conventionnel
- Chariotage de la pièce avec le tour conventionnel
- Réglage de la contre-pointe du tour CN
- Réglage du zéro du tour CN
- Usinage de la pièce avec le tour CN

4.2.1 Introduction aux contrôles



FIGURE 4.3 – *Assistant pédagogique virtuel dans Meca3D donnant une instruction*

L'introduction aux contrôles est effectuée en deux phases : avant le lancement de l'application les participants sont informés du fait qu'ils verront leurs mains dans l'application et que les interactions se feront en utilisant la gâchette de la manette (voir partie 4.3 pour plus de détails sur le fonctionnement des contrôles).

Une fois l'application lancée, un assistant pédagogique virtuel (voir partie 4.3.8 pour une description plus précise de cet assistant) représenté sous la forme d'un robot humanoïde présenté figures 4.3 et 4.4 vient les accueillir et leur explique comment accéder au menu qui contient les instructions et comment demander de l'aide (en levant la main). Cette scène reste en place jusqu'à la validation par l'utilisateur qui doit faire apparaître le menu puis lever la main pour appeler l'assistant, pour prouver qu'il a compris les consignes et qu'il arrive à manipuler l'environnement correctement.

4.2.2 Préparation du tour conventionnel

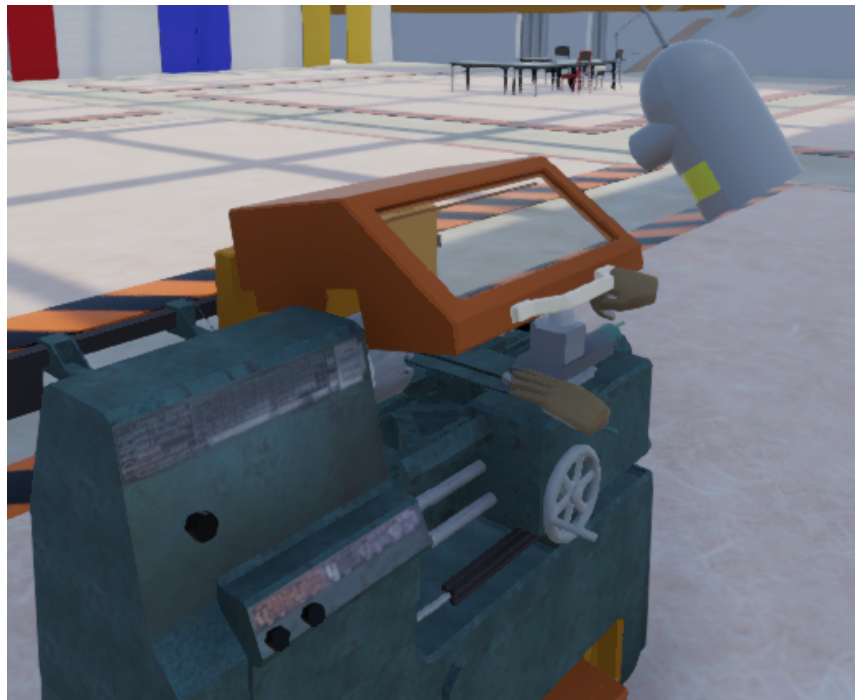


FIGURE 4.4 – *L'assistant pédagogique virtuel de Meca3D montrant comment ouvrir le capot du tour conventionnel*

La première étape consiste à mettre la pièce en place dans le mandrin et lancer la machine. Cette étape a aussi pour but d'introduire à l'utilisation du menu (la pièce se récupère dans l'inventaire qui est situé dans le menu) et au fonctionnement des interactions (ouverture/fermeture du capot et allumage de la machine en appuyant sur un bouton "marche"). Pour cette étape l'apprenant est amené à interagir avec :

- Le capot du tour conventionnel (figure 4.4 montre l'assistant qui effectue l'opération)
- La pièce à usiner pour la placer dans le mandrin
- Le bouton d'allumage de la machine

On considère que le tour est déjà réglé pour la série : vitesses d'avance et de rotation broche réglées, butées de déplacement en place.

4.2.3 Opérations de chariotage et dressage

Une fois la broche en rotation, l'utilisateur doit effectuer un épaulement à l'aide du tour conventionnel tout en respectant les côtes du contrat de phase proposé annexe A.

Dans ce contrat, les phases 20 et 30 servent à préparer le brut : usinage des surfaces de reprise qui serviront à la mise en position de la pièce pour les usinages de la phase 40 sur le tour à commande numérique. C'est la première opération qui requiert la compréhension du fonctionnement de la machine outil ainsi que du procédé d'usinage.

Durant ces opérations, comme pendant tout le reste de l'expérience, il est possible d'utiliser le menu rappelant la procédure à suivre et/ou de faire appel au robot qui montre la manipulation à réaliser (la figure 4.4 montre l'assistant pédagogique interagissant avec le tour conventionnel pour en montrer le fonctionnement à l'apprenant) pour valider l'étape courante.

Ces deux opérations reposent sur le réglage préalable de la machine (déjà réalisé sur le tour virtuel mis à leur disposition). Les butées positionnées sur les axes X et Z permettent de sortir des pièces conformes aux spécifications. Pour cette étape les interactions possibles concernent donc uniquement l'usinage :

- Utiliser les manivelles de contrôle pour déplacer l'outil en x et z
- Lire le vernier afin de s'aligner avec le "zéro"
- Déplacer l'outil avec les manivelles de contrôle pour usiner jusqu'aux butées pré-réglées
- Vérifier que la pièce a été usinée correctement

4.2.4 Passage du tour conventionnel au tour à commande numérique

Une fois le brut préparé sur le tour conventionnel, l'apprenant doit passer sur le tour CN pour effectuer l'usinage de la pièce.

Comme discuté dans la partie 3.4 les techniques de déplacement en réalité virtuelle peuvent provoquer du mal du simulateur, de la désorientation ou être difficile à maîtriser. Les objectifs pédagogiques n'incluant pas le fait de savoir se déplacer dans un atelier de génie mécanique (pour éviter des zones dangereuses par exemple), le changement de machine se fait plus simplement à l'aide d'un bouton positionné dans le menu tête haute (voir section 4.3.7 pour la description de ce menu)

4.2.5 Réglage de la contre-pointe d'un tour à commande numérique

L'activité de réglage de la contre-pointe commence une fois que l'utilisateur fait face au tour CN. Pour effectuer l'opération l'utilisateur doit :

- Ouvrir la porte de la machine
- Déplacer la poupée mobile
- Aligner l'axe de la contre-pointe avec l'axe de la broche en utilisant les vis d'ajustement
- Visualiser et vérifier si l'alignement est bien fait

Ce réglage est, comme mentionné précédemment, nouvelle pour les étudiants ayant participé aux expérimentations et demande du temps et de la rigueur pour être mené à bien.

4.2.6 Réglage du zéro sur un tour CN

Suite au réglage de la contre-pointe il est demandé à l'utilisateur de faire le réglage du zéro sur le tour CN. Cela correspond à faire le calcul du vecteur OmOP avec Om : Origine mesure et OP : Origine Programme. Pour cela il faut utiliser le panneau de contrôle pour :

- Exécuter le programme permettant de faire tourner la tourelle porte outils pour sélectionner le palpeur
- Déplacer le palpeur en utilisant les boutons de déplacement de la tourelle (choix de l'axe, du sens et de l'incrément)
- Palper l'origine pièce (ici la butée dans le mandrin) avec le palpeur en faisant attention à ne pas l'endommager

Il est important pour les étudiants de savoir correctement palper une origine, car la précision d'usinage dépend directement de la précision de ce palpement. De plus, la tête d'un palpeur est extrêmement fragile et il est donc intéressant que les étudiants découvrent avec quelle facilité elle peut être brisée. Étant donné le prix élevé d'un palpeur, il est intéressant de pouvoir proposer aux étudiants une simulation car il est préférable que cette découverte se fasse dans l'atelier virtuel plutôt que dans le monde réel.

La simulation évite aussi un enseignement trop directif. L'absence de risque de casse permet aux étudiants d'essayer plusieurs procédures de palpement et de mieux comprendre l'intérêt de la procédure imposée dans le monde réel

4.2.7 Lancement de l'usinage sur tour CN

Finalement, la dernière étape consiste en la finition, sur le tour CN, de la pièce qui a été préalablement ébauchée avec le tour conventionnel (sections 4.2.2 et 4.2.3). Cette phase de finition comprend les étapes suivantes :

- Placer la pièce dans le mandrin
- Positionner la contre-pointe
- Fermer la porte de la machine
- Lancer le programme d'usinage

Une fois l'usinage lancé, l'outil effectue les usinages programmés et l'apprenant peut récupérer la pièce à la fin.

Une fois Meca3D déployé dans des formations, toutes les opérations décrites ci-dessus doivent être réalisées par des étudiants, supervisés par des professeurs. Ni les premiers ni les seconds n'ayant d'expérience préalable dans le domaine. Cette contrainte importante a guidé le choix des interactions proposées dans la partie suivante afin de s'assurer que l'application est utilisable par le public cible. L'objectif étant que l'application soit jugée utile et utilisable par les acteurs de la formation au génie mécanique dès les premiers prototypes.

4.3 Design de l'application

Dans cette section, nous nous intéressons aux choix de conception qui ont été effectués ainsi qu'à leur implémentation pour la réalisation du prototype présenté.

Le réalisme de l'atelier virtuel et des interactions proposées concourent à recréer un environnement familier dans lequel l'apprenant retrouve facilement ses marques et mobilise naturellement ses connaissances et ses compétences pour progresser dans le scénario. De manière informelle, cette meilleure disposition due à l'expérience peut être observée dans des jeux d'adresse comme The Lab [Valve(2016)] où les personnes ayant une expérience du tir à l'arc sont significativement meilleures dans le mini-jeu correspondant, et ce dès les premiers niveaux.

En retour, la proximité des activités dans l'atelier virtuel avec la réalité a pour objectif de garantir que les connaissances et compétences acquises dans l'environnement virtuel seront transposées de manière pertinente aux situations professionnelles futures. Si les règles qui conditionnent une bonne transposition dans le réel ne sont pas encore délimitées avec précision, il s'agit néanmoins d'un axe d'étude actif qui a déjà produit des connaissances, pour des tâches sensorimotrices simples [Rose et al.(2000)] ou l'apprentissage de longues procédures dans le domaine bio-médical [Hoareau et al.(2017)].

Dans notre cas spécifique et pour le scénario présenté section 4.2, le déplacement ne semblait pas avoir de grande valeur pédagogique, le public cible ayant déjà l'habitude d'évoluer dans un atelier de génie mécanique. De plus, l'étude présentée dans la section 3.4 met en exergue l'absence de méthode de déplacement parfaite. La plupart provoquent le mal du simulateur, et les rares autres, basées sur la téléportation, sont complexes à acquérir et provoquent une perte de repères.

Une alternative au déplacement, utilisable dans notre cas, est de permettre le changement de machine outil sans changer de localisation. Cette solution où l'utilisateur ne se déplace pas d'une machine à l'autre mais choisit la machine qu'il veut utiliser est celle qui a été employée. Cela afin de limiter le nombre de métaphores d'interactions différentes que l'utilisateur doit acquérir pour utiliser l'environnement de réalité virtuelle et éviter de provoquer le mal du simulateur au détriment de la fidélité de l'agencement de l'atelier.

Pour les manipulations, nous avons décidé, tout au long de l'expérience proposée, de n'utiliser qu'un seul bouton qui sert d'indication pour sélectionner lorsqu'il est enfoncé (*Indication to select* dans la taxonomie figure 3.2) et qui déclenche la fin de l'opération de manipulation lorsqu'il est relâché (*Indication to drop* dans la taxonomie figure 3.9). Ce choix a été guidé par trois raisons : réduire la charge cognitive sur les utilisateurs novices, faciliter les interactions, et permettre une compatibilité avec le plus grand nombre de contrôleurs possible (VR et non VR). Dans le cas des contrôleurs VR (*Vive Controller* et *Oculus Touch*), le bouton utilisé est la gâchette. Dans le cas du Leap Motion ce bouton est émulé par la fermeture de la main. En pratique, avec les trois contrôleurs mentionnés, la valeur utilisée est analogique et cette valeur est reflétée par le degré d'ouverture de la main dans le monde virtuel (entre ouverte et fermée). Cependant, du point de vue du moteur d'interaction, cette valeur est utilisée de manière binaire pour déclencher ou



FIGURE 4.5 – L'ouverture de la porte du tour à commande numérique dans Meca3D se fait grâce à une métaphore intuitive très proche de l'interaction physique habituelle.

relâcher une manipulation.

Dans la partie 4.2 nous avons décrit les actions que l'utilisateur doit effectuer pour mener à bien la procédure proposée. Nous allons maintenant nous intéresser aux interactions retenues pour chacune de ces opérations ainsi que leur affordance.

4.3.1 Translation d'objets suivant un axe

La translation est utilisée pour deux tâches de Meca3D : ouvrir/fermer la porte du tour à commande numérique (figure 4.5) et déplacer le chariot de la contre-pointe. La méthode retenue pour ces opérations est l'interaction la plus simple possible, à savoir : *sélectionner* la poignée ou le chariot en les touchant puis *maintenir le déclencheur appuyé* pour déplacer l'objet suivant son axe. Une fois le *déclencheur relâché*, l'objet continue sa course en bénéficiant d'une inertie égale à la vitesse qu'il avait à l'instant où il a été relâché, et en subissant un ralentissement jusqu'à l'arrêt (position finale en butée ou avant).

4.3.2 Rotation autour d'un axe à l'aide d'une poignée

Pour les opérations de rotation, il a été nécessaire de distinguer l'affordance que possède les objets à utiliser dans le monde réel. Ceux qui possèdent une poignée ont la capacité d'être pris en main et cette affordance est transposable facilement avec la métaphore de la main virtuelle dans l'environnement immersif (exemples d'utilisations de cette métaphore : figures 4.4 et 4.6). Cela est le cas du capot du tour conventionnel et de ses manivelles qui sont manipulables à l'aide d'une poignée. Pour ces interactions la méthode de sélection est la même que pour la translation, l'objet tourne autour de son axe en suivant le déplacement



FIGURE 4.6 – *Rotation de la manivelle du tour conventionnel à l'aide d'une poignée. Seule la position de la main virtuelle est utilisée pour cette opération.*

de la main virtuelle et l'interaction se termine au relâchement du déclencheur. Dans ce cas, de la même façon que pour la translation où seul le déplacement suivant l'axe principal est pris en compte, seul le déplacement angulaire autour de l'axe de rotation est pris en compte.

4.3.3 Vissage ou rotation d'un bouton

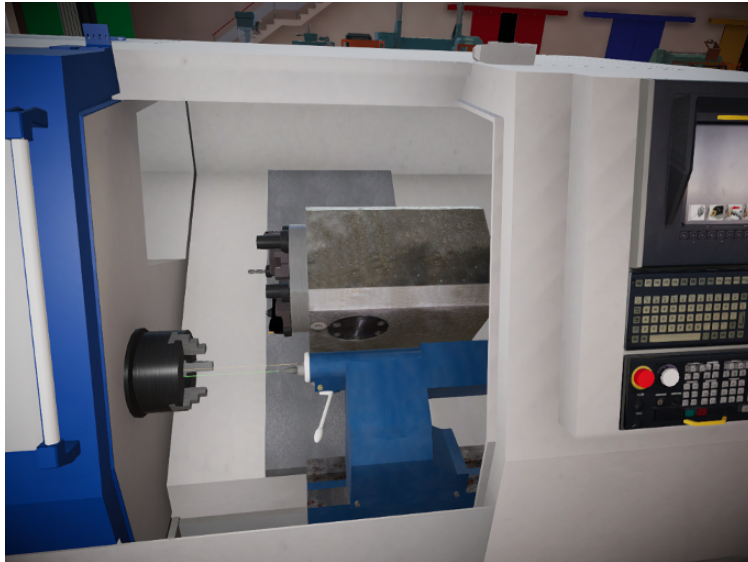
À la différence des cas vus jusqu'à maintenant, les opérations de vissage ou de rotation d'un bouton ne reposent pas sur l'utilisation d'une poignée. Le vissage se fait à l'aide d'un outil et la rotation d'un bouton se fait plutôt en bougeant les doigts dans le monde réel. Pour cette interaction nous avons décidé d'utiliser un outil qui remplace la main virtuelle de façon endogène – c'est à dire lorsque la main de l'utilisateur est proche d'un objet possédant l'affordance d'être tournée à l'aide d'un outil (voir fig 4.7 (a)). Cet outil (une clé Allen) apparaît pour la première fois quand l'utilisateur doit visser une vis et permet d'utiliser la même interaction que pour la rotation à l'aide d'une poignée.

La mise en place de l'outil se fait en utilisant la valeur analogique de la gâchette de façon à ce que l'outil soit en place au moment où l'interaction est déclenchée par la valeur seuil (figure 4.7 (b)). L'outil est alors fixe par rapport à l'objet à tourner et l'utilisateur bouge la poignée de l'outil en bougeant la main.

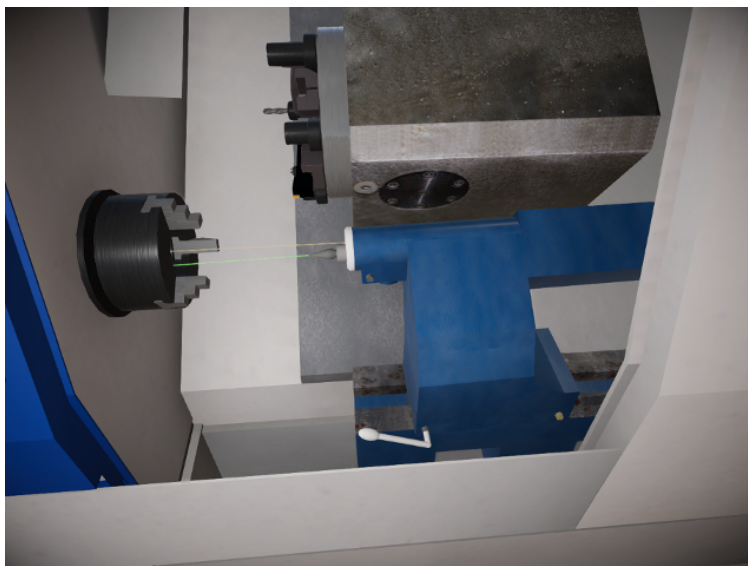
Dans le cas du bouton rotatif du panneau de commande, la même interaction a été utilisée et une clé apparaît en approchant la main de ce bouton (figure 4.8).

4.3.4 Mise en place de la pièce à usiner

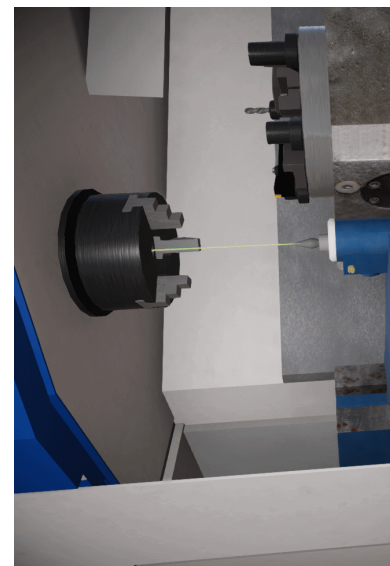
La pièce à usiner étant un objet commun aux différentes étapes d'usinage et non lié aux machines, il est nécessaire qu'elle soit disponible dans les différents scénarios. Nous



(a) La main virtuelle se transforme en outil à l'approche d'une vis



(b) Mise en place de l'outil en appuyant sur la gâchette



(c) La contre-pointe est réglée quand les axes sont confondus

FIGURE 4.7 – Réglage de la contre-pointe



FIGURE 4.8 – *Le bouton rotatif du panneau de contrôle possède la même affordance que les vis*

avons donc choisi de la placer dans un inventaire. Cet inventaire est placé dans le menu tête haute et il faut donc utiliser une méthode de sélection à distance pour récupérer la pièce (fig 4.9 (a)). Une fois la pièce sélectionnée à l'aide du déclencheur, elle vient se positionner dans la main virtuelle de l'utilisateur et se déplace sans contrainte tant que la main est fermée (figure 4.9 (a) et (b)). Le relâchement de l'objet peut donner lieu à deux comportements : soit l'objet est mis en place par l'utilisateur et la pièce se positionne parfaitement ((figure 4.9 (c)), soit l'objet n'est pas en place lors du relâchement et la pièce retourne dans le menu.

4.3.5 Boutons

Pour l'utilisation de machines-outil, il est nécessaire de pouvoir appuyer sur des boutons. Le fonctionnement précis des différents types de boutons après l'interaction de l'utilisateur (radio, mono-stable, bi-stable, ...), n'est pas décrit dans ce manuscrit. L'utilisation des boutons, notamment dans un environnement chargé comme le panneau de contrôle d'une machine outil à commande numérique demande plus de précision que pour les autres interactions. À cette fin, lorsque la main virtuelle rentre dans la zone du panneau de contrôle, sa forme change de façon endogène afin de faciliter la sélection (figure 4.10 (a)). Lorsque la main virtuelle touche un bouton, une rétroaction visuelle montre à l'utilisateur qu'il peut appuyer sur le bouton (fig 4.10 (b)). De plus, pour les boutons le texte est retranscrit en plus gros au dessus du bouton pour faciliter la lecture (figure 4.10 (b)) Finalement pour appuyer sur le bouton, l'utilisateur utilise le déclencheur du périphérique de contrôle ce qui fait s'enfoncer le bouton et lance l'action correspondant au bouton appuyé.

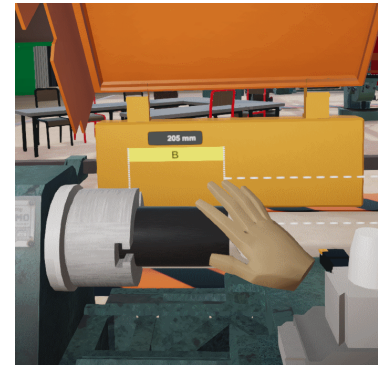
(a) Sélection d'un item dans le menu



(b) récupération de l'item



(c) positionnement approximatif



(d) mise en place assistée

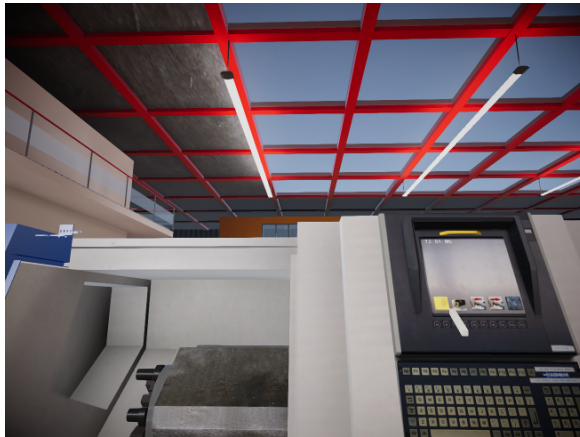
FIGURE 4.9 – Récupération et positionnement du brut dans le tour conventionnel – le positionnement final est assisté

4.3.6 Mise en évidence d'objet dans la scène

Afin d'attirer l'attention des utilisateurs, la méthode choisie pour mettre en évidence un objet dans l'atelier virtuel est de le faire "clignoter" en utilisant la propriété émissive du matériau de l'objet. Cette mise en évidence est utilisée pour aider le joueur à suivre la procédure proposée en attirant l'attention ou en indiquant clairement les objets à manipuler pour réaliser la tâche actuelle.

4.3.7 Affichage tête haute

Un affichage tête haute a été utilisé dans Meca3D pour (i) informer l'utilisateur de la procédure à suivre, (ii) donner des informations à l'utilisateur sur la tâche à réaliser pour avancer dans la procédure, (iii) permettre le changement de machine dans l'atelier



(a) Outil spécifique pour l'utilisation des boutons



(b) Changement de couleur de l'outil et affichage du texte lorsque la main virtuelle est en contact avec un bouton

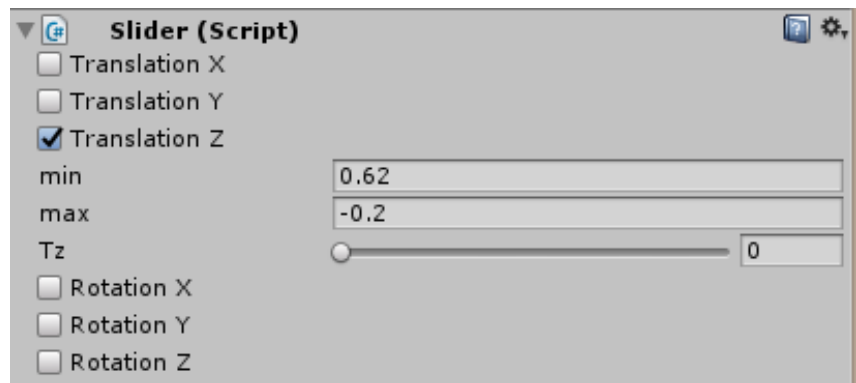
FIGURE 4.10 – Les boutons du panneau de commande du tour à commande numérique. L'appui sur le bouton est effectif lorsque la gâchette du contrôleur est appuyée.

et (iv) récupérer des objets dans l'inventaire. Ce menu est situé au dessus des machines et s'affiche lorsque l'utilisateur regarde vers le haut. Il est possible d'interagir avec ce menu en utilisant le rayon émanant de la main virtuelle lorsqu'elle pointe dans sa direction (figure 4.9 (a)). L'onglet d'aide, en plus de proposer une description de la tâche à réaliser peut être utilisé pour activer ou désactiver la mise en évidence des objets à utiliser pour réaliser la tâche courante. L'interaction avec ces boutons se fait à distance en utilisant la gâchette pour déclencher l'action correspondante (changement de machine, aide, pièce dans l'inventaire).

4.3.8 Assistant pédagogique

Le rôle de l'assistant pédagogique proposé dans Meca3D est d'aider les apprentis opérateurs qui se trouvent bloqués à l'une des étapes de la procédure. L'utilisateur peut alors faire appel à l'assistant pédagogique en utilisant un geste déclencheur. Le geste le plus simple et le plus instinctif que nous ayons trouvé est de lever la main, comme en salle de classe, pour demander de l'aide. Cette interaction déclenche l'arrivée de l'assistant qui donne alors des instructions plus détaillées que celles du menu à propos de l'opération à réaliser pour avancer dans la procédure. De plus, si l'utilisateur le souhaite, il peut demander à l'assistant de lui montrer comment effectuer la manipulation directement sur la machine. Pour ce faire, l'utilisateur n'a pas à laisser la place libre devant la machine pour que l'assistant entame la démonstration. Une fois la démonstration finie, la machine est réinitialisée dans l'état où elle était au début de l'étape courante de la procédure afin que l'utilisateur effectue la manipulation de lui-même. La représentation choisie pour l'assistant pédagogique se limite à sa tête et ses mains. L'avantage est que cela simplifie grandement l'enregistrement de clips de démonstration car il suffit d'avoir accès au même

FIGURE 4.11 – *Le composant slider visualisé dans l'éditeur*



matériel que pour jouer au jeu, tout en étant suffisant pour que l'utilisateur s'identifie à l'assistant et pour montrer les manipulations. Il a été montré dans [Blome et al.(2017)] que ce type de représentations est suffisante pour aider l'acquisition des gestes de premier secours à des apprenants en réalité virtuelle.

Nous avons décrit dans cette partie toutes les métaphores d'interaction proposées dans Meca3D et nous nous intéressons dans la partie suivante aux autres systèmes implémentés pour la création de ce prototype.

4.4 Implémentation / systèmes

4.4.1 Sliders

Étant donné le domaine d'application et les systèmes mécaniques à modéliser pour permettre un comportement cohérent à l'environnement virtuel, nous avons décidé de regrouper en un seul composant élémentaire la capacité d'un objet à être déplacé.

Ce composant, nommé Slider (voir figure 4.11), permet de contraindre le déplacement d'un objet à des rotations et des translations suivant les axes locaux de celui-ci et inclut des bornes aux translations et rotations autorisées. Cela nous a permis d'éviter toute incohérence dans le comportement des objets manipulés par l'utilisateur sans avoir recours au moteur physique.

De plus cela nous a permis de lier simplement des objets qui se déplacent ensemble au travers de systèmes mécaniques complexes comme par exemple le chariot porte-outil du tour conventionnel qui est entraîné par une manivelle. La figure 4.12 montre la manivelle qui entraîne le chariot porte-outil auquel elle est attachée.

4.4.2 Scénarisation

Le système de scénarisation implémenté dans Meca3D permet la mise œuvre du parcours pédagogique décrit dans la partie 4.2. L'aspect très linéaire de ce scénario à l'intérêt de faciliter sa mise en œuvre tout en assurant que les participants aux expérimentations seront confrontés aux mêmes interactions (i.e. pas de parcours différents dûs à d'éventuelles

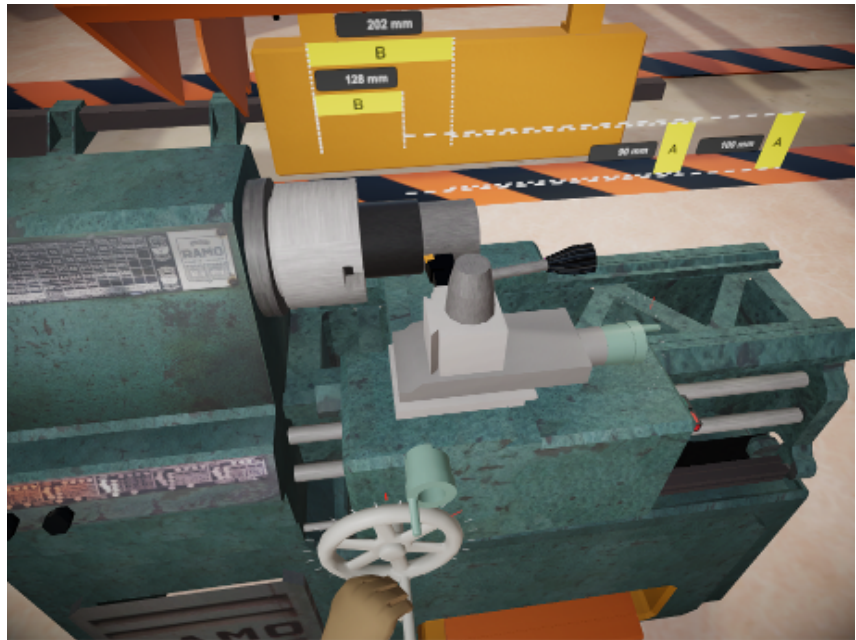


FIGURE 4.12 – *Usinage procédural de la pièce – la tête d’usinage enlève de la matière à la pièce à usiner grâce aux collisions.*

branches narratives). Le principe derrière le système utilisé est que chaque objectif se décompose en étapes élémentaires qui demandent l’utilisation d’un ou plusieurs objets de la scène pour changer l’état du système mécanique ou de la pièce à usiner. Chacune des étapes est donc décrite par les objets à mettre en mouvement ainsi que par un déclencheur de fin dépendant de l’état du système mécanique pour passer à l’étape suivante.

4.4.3 Usinage procédural

Pour permettre à l’utilisateur d’usiner des pièces avec le tour conventionnel, et, dans une moindre mesure, le tour à commande numérique (une simple animation aurait pu suffire dans ce second cas), un système d’usinage procédural a été implémenté. Figure 4.12 montre une pièce en train d’être usinée par le tour conventionnel. Le principe de ce système est d’utiliser la collision entre la tête d’usinage (en orange sur la figure) et les cylindres constituant la pièce de façon à simuler l’enlèvement de matière. Cette façon de faire a l’avantage d’être plus performante que la décomposition en voxels mais peut tout de même ralentir fortement la simulation si l’opérateur effectue un usinage de biais qui produit beaucoup de cylindres. De plus ce système ne peut produire que des pièces possédant une symétrie centrale et n’est donc pas adapté à la détection de certains problèmes d’usinage.

4.4.4 Animations

Mains

Les animations jouées images par images en fonction de la valeur analogique du déclencheur utilisé pour le contrôle des mains virtuelles ont été enregistrées à l’aide du Leap Motion. La première itération du système d’animation des mains jouait une animation en boucle afin de rendre les mains “vivantes” cependant il nous est rapidement

apparu que ce mouvement entre dans le domaine de la “vallée dérangeante”⁸.

Assistant virtuel

L’assistant virtuel possède deux types d’animation : les animations où il reste immobile qui sont celles jouées lorsqu’il est en état d’attente ou lorsqu’il fait un signe de la main, et les animations où l’assistant est mobile qui sont celles utilisées lorsqu’un utilisateur fait appel à lui. Toutes ces animations ont été réalisées en enregistrant la pose d’un utilisateur familier du geste réel et de l’interface VR lors de la réalisation des différentes manipulations à effectuer pendant la procédure retenue (position et rotation des manettes et du casque ainsi que la valeur analogique correspondant à l’action de préhension). Dès lors que l’assistant est appelé et commence à montrer une manipulation au joueur, les mains de cet assistant prennent la capacité d’interagir avec l’environnement. Elles sont alors similaires à celles du joueur en tout point. De par la nature spécifique des animations enregistrées pour l’assistant, avant de commencer une démonstration et afin de s’assurer que l’environnement se comportera de la même façon que lors de l’enregistrement, la scène est réinitialisée dans l’état où l’animation avait été enregistrée (qui correspond normalement à l’état initial du système attendu au début de l’étape qui est présentée à l’utilisateur).

4.4.5 Traces

Un système de traces a été mis en place pour récolter et sauvegarder plusieurs niveaux d’informations. Les informations bas-niveau qui contiennent toutes les entrées de l’utilisateur (position du casque et des manettes ainsi que l’appui sur le bouton d’interaction) et permettent de rejouer a posteriori le passage des participants. Des informations de plus haut niveau sont aussi sauvegardées, à savoir tous les événements liés aux interactions (pré-sélection, sélection, début d’interaction et relâchement) et au scénario qui sont recueillis en temps réel.

4.5 Conclusion

Le prototype ainsi réalisé avec le scénario et les systèmes décrits dans cette partie et la précédente a été utilisé dans deux sessions d’expérimentation avec des enseignants et des étudiants de l’IUT GMP de Toulouse avec pour objectif de valider à la fois la démarche suivie ainsi que les différents éléments constituant le prototype.

8. La vallée de l’étrange, ou *uncanny valley* en anglais, est provoquée par une représentation suffisamment réaliste pour que l’observateur s’y identifie mais aussi suffisamment différente pour qu’il perçoive cette ressemblance comme dérangeante. Dans [Mori et al.(2012)], Mori revient sur ce concept qu’il avait établi en 1970 et identifie le mouvement comme étant l’un des facteurs les plus importants dans ce phénomène.

5

Expérimentations avec Meca3D

5.1 Introduction

Meca3D a été évalué en deux sessions d'expérimentation menées dans l'atelier de l'IUT GMP (Génie Mécanique et Productique) de Toulouse. La première session s'est déroulée dans une des salles attenantes à l'atelier et incluait majoritairement des enseignants de l'établissement. La deuxième session s'est déroulée dans l'atelier, où un espace avait été libéré, et incluait exclusivement des étudiants de l'IUT. L'objectif de ces expérimentations était d'évaluer l'utilisabilité, l'utilité et l'acceptabilité de l'application proposée, ces trois facteurs ayant été identifiés dans [Tricot(2007)] comme les facteurs de succès d'un jeu d'apprentissage. Cela nous a aussi permis d'obtenir des retours des professeurs et étudiants du domaine qui seront les utilisateurs finaux de Meca3D.

Le système décrit dans le chapitre précédent correspond à celui qui a été proposé durant la deuxième phase d'expérimentation. Lors de la première phase, certains éléments tels que l'assistant pédagogique n'étaient pas encore implémentés et des changements mineurs ont été effectués sur le scénario et les systèmes utilisés suite aux retours de la première session. La description de Meca3D tel qu'il a été utilisé lors de la première session d'expérimentation peut être trouvée dans [Muller et al.(2017)].

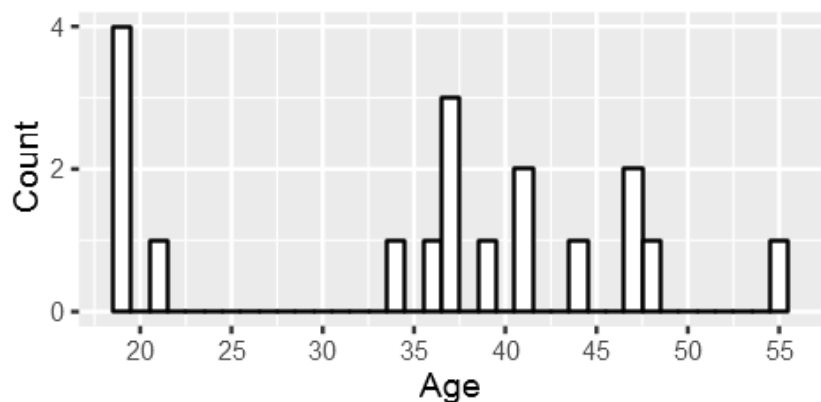


FIGURE 5.1 – *Distribution de l'âge des participants pour la première session (n=19)*

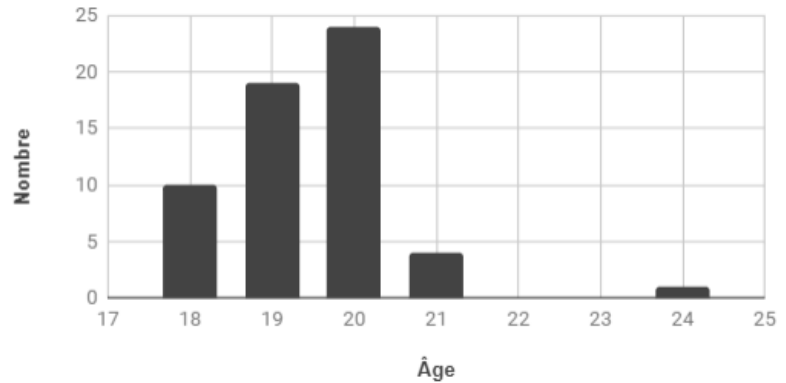


FIGURE 5.2 – Distribution de l'âge des participants pour la deuxième session ($n=59$)

5.2 Déroulement des expérimentations

5.2.1 Première session – Enseignants

Le protocole expérimental déployé pour la première session s'est déroulé en quatre phases :

1. Introduction à la réalité virtuelle et à l'utilisation des manettes avec *Oculus First Contact* ([Oculus(2016)]).
2. Briefing sur le contrat de phase (voir annexe B) à suivre et sur les tâches à réaliser dans l'atelier virtuel.
3. Utilisation de Meca3D jusqu'à complétion du scénario dans son intégralité
4. Débriefing et réponse aux questionnaires utilisateurs : RSSQ, UX (expérience utilisateur), questions ouvertes.

5.2.2 Deuxième session – Étudiants

Pour la deuxième session, l'introduction en utilisant une application tierce a pu être abandonnée car une phase d'introduction aux contrôles a été ajoutée et la plupart des participants ont découvert la réalité virtuelle avec Meca3D. Le protocole suivi était constitué à nouveau de quatre phases :

1. Questionnaire pré-test : RSSQ, questions de cours, informations personnelles
2. Présentation orale du fonctionnement des contrôles
3. Réalisation du scénario de Meca3D dans son intégralité
4. Questionnaire post-test : RSSQ, UX, questions de cours

5.3 Démographie des participants

5.3.1 Première session – Enseignants

La première session d'expérimentation de Meca3D a été réalisée avec 18 participants de l'IUT GMP de Toulouse. Cinq d'entre eux sont des étudiants (28%) et les 13 autres

(72%) sont des enseignants de l'établissement. La plupart d'entre eux sont des hommes (89%) et la distribution de l'âge des participants est présentée dans la figure 5.1.

Aucun participant n'avait d'expérience préalable avec de la VR haut de gamme (tels qu'un système CAVE ou un casque de réalité virtuelle avec système de suivi et des contrôleurs) mais certains d'entre eux (22%) avaient déjà rencontré d'autres formes de VR (casques mobiles, ...). Les participants sont principalement non-joueurs, 50% ne jouant pas aux jeux-vidéo, 39% jouant moins d'une heure par semaine et seulement 11% jouant plus que cela (aucun d'entre eux ne joue plus de 5h par semaine).

5.3.2 Deuxième session – Étudiants

La deuxième session d'expérimentation de Meca3D a été réalisée avec 59 étudiants de l'IUT GMP de Toulouse, la plupart d'entre eux en deuxième année. La répartition de l'âge des participants peut être visualisée figure 5.2. D'un point de vue de la parité, les étudiants du domaine du génie mécanique étant majoritairement des hommes, seul 12.7% sont des femmes.

Ces participants possèdent des profils de joueurs répartis relativement équitablement : 27% d'entre eux ne jouent pas aux jeux vidéos, 31.7% d'entre eux jouent moins d'une heure par semaine, 25.4% d'entre eux jouent entre une et cinq heures par semaine et le reste (15.9%) joue plus de 5h par semaine. Finalement, seul l'un d'entre un possède un casque de réalité virtuelle et seulement 27% d'entre eux ont déjà fait l'expérience de la réalité virtuelle une fois dans leur vie. Le reste (71.4%) n'a aucune expérience dans ce domaine.

5.4 Résultats de la première session

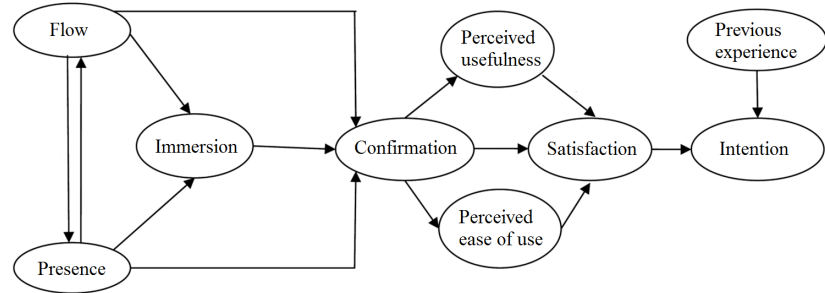
Dans cette section, nous présentons et discutons les résultats de la première session d'expérimentation de Meca3D. Cette session commençait par une introduction à la VR grâce à *Oculus First Contact*, mais il était demandé aux participants de ne pas prendre en compte cette introduction dans leurs réponses aux questionnaires et de se référer uniquement à leur expérience du prototype de Meca3D.

5.4.1 Expérience utilisateur

Les questions liées à l'expérience utilisateur ont été notées sur une échelle de Likert à 7 points, la valeur la plus faible signifiant qu'ils sont en désaccord avec l'assertion proposée et la plus fort signifiant qu'ils sont parfaitement d'accord.

Le modèle proposé par [Shin et al.(2013)] dans la figure 5.3 représente les relations entre les indicateurs d'expérience utilisateur qui ont été évalués à l'aide du questionnaire lors des expérimentations et dont les résultats sont présentés dans la figure 5.4. Chaque résultat est une moyenne des réponses données à plusieurs questions. Ils sont organisés suivant 6 métriques :

FIGURE 5.3 – Le modèle de l'expérience utilisateur de [Shin et al.(2013)] caractérise l'expérience utilisateur par plusieurs composants (nœuds du graphique) qui s'influencent entre eux (arc).



- Confirmation (des attentes de l'utilisateur)
- Facilité d'utilisation perçue
- Immersion (l'utilisateur a-t-il perdu le sens du temps et de l'endroit où il était)
- Intention d'utilisation
- Satisfaction
- Utilité perçue

Ces mesures permettent de conclure que les participants (en grande majorité des enseignants) ont perçu l'application comme utile et facile d'utilisation – avec respectivement 5.7 et 5.46 de moyenne pour une échelle entre 1 et 7. Il est aussi possible de déduire des autres mesures (notamment de l'intention d'utilisation, de la satisfaction et de la confirmation avec des moyennes respectives de 5.8, 6.3 et 5.7) que l'application leur a semblé acceptable, dans le sens où ils pensent l'utiliser en cours. Ces trois facteurs – utilité, utilisabilité et acceptabilité – ont été identifiés par [Tricot(2007)] comme les facteurs de succès d'un jeu d'apprentissage et les réponses apportées par les enseignants à ces questions nous permettent de conclure que la direction empruntée dans la réalisation de ce prototype peuvent permettre la production d'un jeu d'apprentissage qui sera effectivement utilisé en cours.

Ces résultats peuvent cependant être biaisés par l'influence de la confirmation sur les mesures qui nous intéressent. En effet, la confirmation correspond au degré auquel l'application proposée remplit les attentes des participants. Cet indicateur, comme le montre la figure 5.3, influence directement la perception de l'utilité et de la facilité d'utilisation. Les participants n'ayant aucune expérience en réalité virtuelle avaient des attentes faibles et cela a probablement influé leur perception de terme d'utilité et de l'utilisabilité du jeu d'apprentissage. Cette influence positive est généralement appelé l'effet «waouh» (*wow effect*).

5.4.2 Traces logicielles

Dans cette section nous nous intéressons aux informations extraites des traces récoltées pendant l'expérimentation et en particulier deux indicateurs temporels : (i) la répartition du temps des participants entre interaction, lecture du menu et réflexion et (ii) la répartition du temps passé par activité.

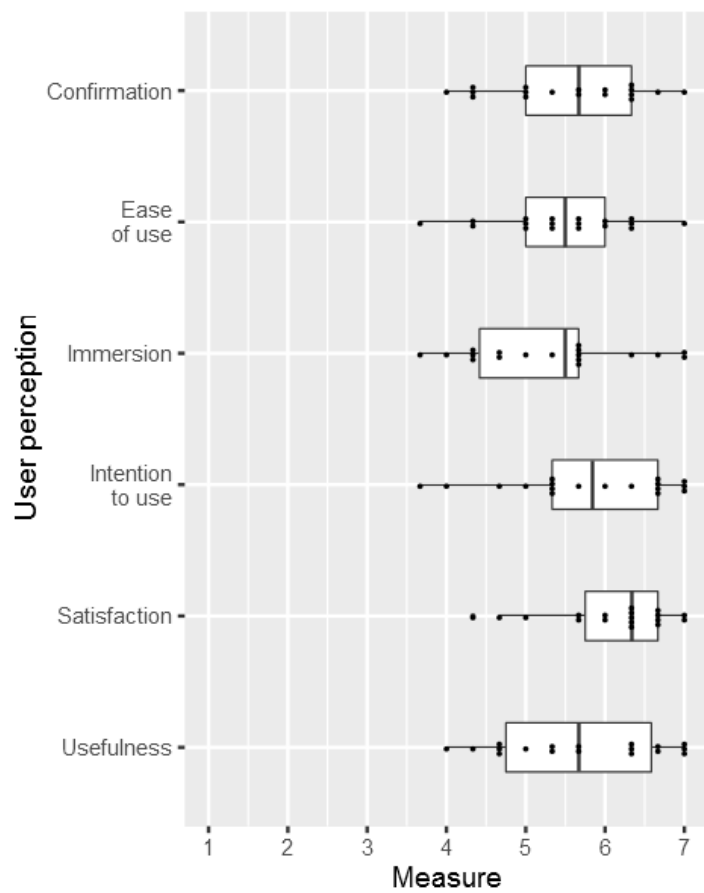


FIGURE 5.4 – *Résultat du questionnaire expérience utilisateur (n=18).*

les valeurs sont la moyenne des réponses à plusieurs assertions proposées pour chaque indicateur et notées sur un échelle de Likert a 7 niveaux.

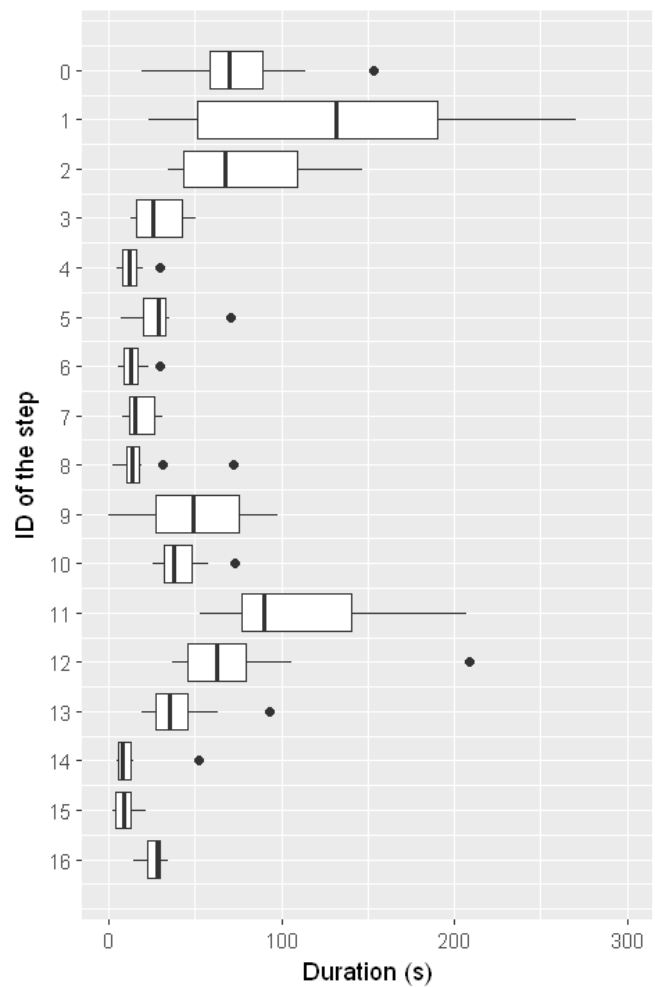
1 : désaccord total

7 : complètement d'accord

FIGURE 5.5 – Répartition du temps passé par activité. ($n=12$)

Liste des étapes :

- 0 Select the manual lathe
- 1 Perform a facing operation
- 2 Perform a turning operation
- 3 Select the CNC lathe
- 4 Open the door
- 5 Move the tailstock
- 6 Use the top screw
- 7 Use the left-bottom screw
- 8 Use the right-bottom screw
- 9 Finish adjusting the tailstock centre
- 10 Select the touch probe
- 11 Use the command panel to probe the top of the workpiece
- 12 Probe the front of the workpiece
- 13 Select the machining tool
- 14 Close the door
- 15 Bring the tailstock centre out
- 16 Launch the machining program



La figure 5.5 montre la répartition du temps passé par les participants pour chacune des étapes du scénario. Il apparaît que certaines étapes ont une variance bien plus grande que les autres pour le temps de complétion. Cela est normal pour l'étape 0 qui comprend pour la plupart des participants la mise en place du casque de réalité virtuelle et la récupération des manettes en plus de la sélection du tour manuel. Les autres étapes proposant une grande variance sont les étapes 1, 2, 9, 11 et 12. Elles correspondent aux activités plus complexes qui demandent la mobilisation de connaissance, leur retranscription dans l'environnement de réalité virtuelle et des manipulations plus précises.

Pendant les étapes 1 et 2, le participant doit usiner la pièce avec le tour manuel. Ces activités demandent de comprendre les métaphores proposées pour les verniers et pour l'utilisation des manivelles, ainsi que de mobiliser les connaissances des participants à propos de la tâche. Il est à noter que bien que les participants soient des enseignants en génie mécanique, certains n'avaient pas utilisé de tour manuel récemment.

L'étape 9 consiste à utiliser trois vis placées sur le chariot de la contre-pointe pour aligner l'axe de la contre-pointe avec l'axe des mors du tour à commande numérique. Cette tâche demande à la fois de la précision et une bonne connaissance de l'influence des vis sur l'orientation et la position de la contre-pointe.

Durant les étapes 11 et 12, les participant doivent utiliser le panneau de commande numérique pour déplacer le palpeur et régler le zéro de la machine en palpant la surface de référence à l'aide d'un palpeur sans le casser.

Finalement l'étape 13 possède aussi une grande variance qui est due au fait que certains participants ont plus ou moins désengagé le palpeur avant de sélectionner l'outil d'usinage et ont donc passé plus ou moins de temps à finir le désengagement après la distance minimum parcourue.

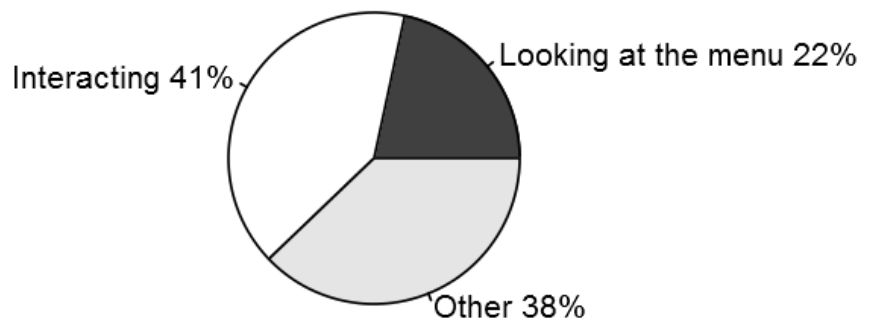


FIGURE 5.6 – Temps passé à interagir ou regarder le menu. ($n=12$)

La figure 5.6 montre le temps passé par les utilisateurs à interagir et regarder le menu. Les participants ont passé une grande partie du temps (41% en moyenne) à interagir, 22% du temps à regarder le menu tête haute. 38% du temps a été dédié à l'observation ou la réflexion.

5.4.3 Mal du simulateur

Compte tenu du contexte de notre travail, à savoir la conception d'un outil pour l'apprentissage, et destiné à un public peu familiarisé avec la VR, la limitation du mal du simulateur a été un critère primordial lors des décisions concernant la conception. Suite

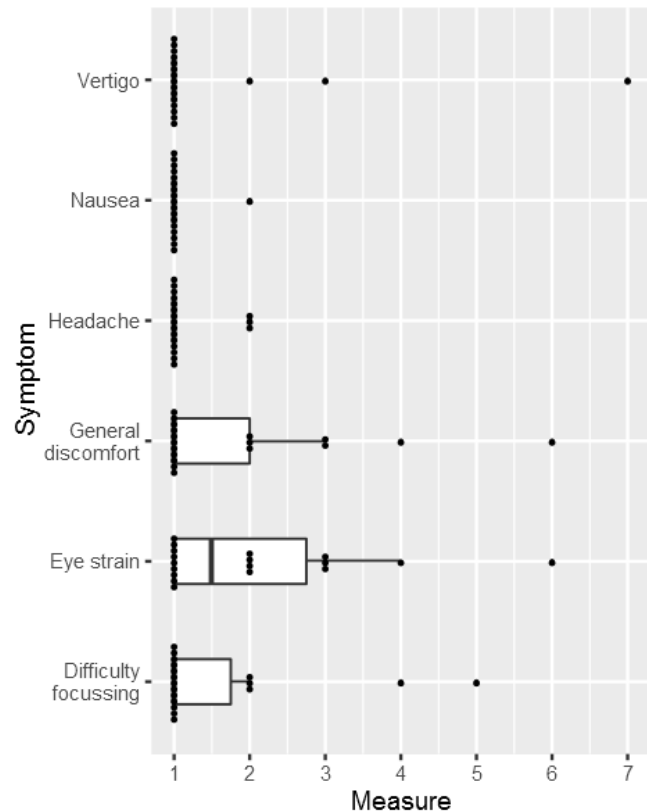


FIGURE 5.7 – Répartition des réponses au questionnaire RSSQ [Kim et al.(2004)]. ($n=12$)

aux expérimentations, les participants ont rempli une version raccourcie du questionnaire RSSQ [Kim et al.(2004)]. La répartition des réponses données par les participants à ce questionnaire peut être trouvée figure 5.7.

Les réponses montrent que les choix effectués pour limiter le mal du simulateur étaient bons : les participants ont généralement été peu affectés, en particulier pour les symptômes les plus inconfortables. Seul un participant a ressenti des vertiges durant l'expérience et a dû s'arrêter avant la fin. Ce participant a déclaré s'être senti déconnecté de l'environnement et qu'il avait du mal à maintenir son équilibre avec le casque sur la tête. Le seul autre commentaire sur le mal du simulateur est que l'image était floue à cause des mouvements du casque sur la tête.

Ces résultats, bien qu'encourageant doivent encore être confirmés avec des expérimentations sur une durée plus longue, en faisant passer le questionnaire avant et après l'expérience ainsi qu'avec plus de participants. Mais il semblerait que la décision de n'utiliser que le suivi du casque comme méthode de déplacement ne provoque que peu de mal du simulateur et que les effets résiduels sont en grande partie dus à la technologie des casques de réalité virtuelle.

Variable	Immersion	Utilité perçue	Facilité d'utilisation perçue	Confirmation	Satisfaction	Intention d'utiliser
Moyenne session 1	5.31	5.70	5.46	5.54	6.09	5.80
Moyenne session 2	5.75	5.56	5.64	5.80	6.11	5.53
Écart-type session 1	1.01	1.00	0.83	0.91	0.77	1.04
Écart-type session 2	0.92	1.19	1.04	0.95	0.95	1.19
<i>p</i> -value (test χ^2)	0.035	0.356	0.497	0.203	0.235	0.451

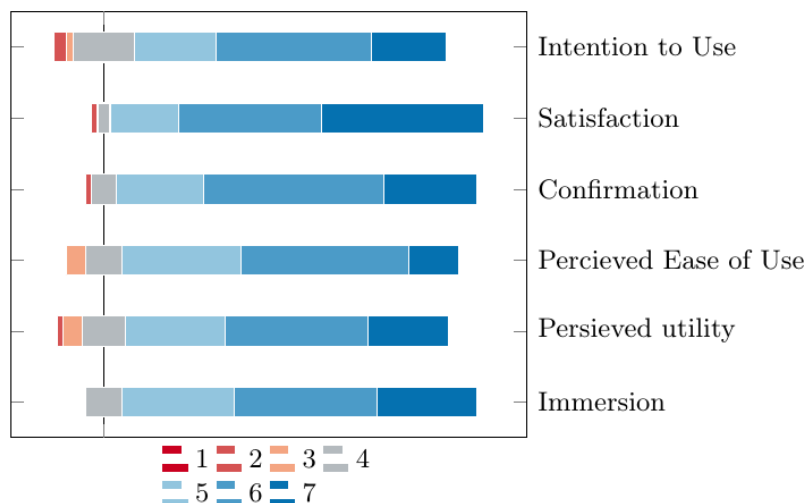
TABLE 5.1 – Résumé des résultats des deux sessions et comparaison à l'aide d'un test χ^2 – L'hypothèse nulle pour chaque question du questionnaire utilisateur est que les résultats d'expérience utilisateur observés sont indépendants de la session.

5.5 Résultats de la deuxième session

Dans cette partie nous présentons et discutons les résultats obtenus lors de la deuxième vague d'expérimentation. Cette vague s'est déroulée uniquement avec des étudiants et l'introduction à l'aide d'une application tierce n'a pas été renouvelée (voir paragraphe 5.2.2).

5.5.1 Expérience utilisateur

FIGURE 5.8 – Expérience utilisateur pour la session 2 ($n=59$)



Les principaux résultats obtenus lors de cette deuxième session sont résumés dans le tableau 5.1 et comparés aux résultats obtenus lors de la première session. Nous observons une amélioration d'une session sur l'autre de la moyenne des réponses aux questions liées

à l’immersion, la facilité d’utilisation, la confirmation et la satisfaction et une diminution de l’utilité perçue et de l’intention d’utiliser.

Ces deux dernières mesures ont potentiellement été influencées par la différence de statut des participants (professeurs pour la session 1 et étudiants pour la session 2). En effet, pour ce qui est de l’intention d’utiliser l’application, un certain nombre d’étudiants ont rapporté qu’ils ne pensent pas que ce genre de jeu d’apprentissage en réalité virtuelle sera déployé durant leur formation initiale, ce qui leur a rendu difficile la projection dans une situation d’utilisation réelle.

D’un autre côté, pour ce qui est de l’utilité perçue, les professeurs ont potentiellement eu plus tendance à se projeter dans une mise en place du système dans des formations réelles avec un portefeuille de scénarios plus étoffé répondant à leurs besoins (notamment pour l’initiation à l’utilisation de machines-outils).

Finalement, seule l’immersion présente une *p-value* permettant de réfuter l’hypothèse nulle des tests χ^2 présentés table 5.1. C’est donc la seule observation pour laquelle la différence observée entre les sessions est significative. Cette différence peut être due à différents facteurs : l’ajout de l’assistant, la simplification des réglages demandées (au travers d’une plus grande tolérance), ou encore l’utilisation d’un ordinateur plus puissant (réduisant les problèmes de performances).

Les résultats étant très similaires d’une session à l’autre, les conclusions discutées dans la partie 5.4.1 le sont aussi pour le deuxième public cible de Meca3D, les étudiants. L’application répond aux critères de succès que sont l’utilisabilité et l’acceptabilité et les questionnaires d’expérience utilisateur témoignent d’une utilité perçue.

5.5.2 Mal du simulateur

La figure 5.9 présente les résultats du mal du simulateur perçus lors de la deuxième session d’expérimentation. Comme proposé par [Kim et al.(2004)], et contrairement à la première session, nous nous sommes intéressés à la différence des réponses aux questions posées avant et après l’expérimentation.

La table 5.2 résume les résultats observés pour les deux sessions et donne la *p-value* du test χ^2 dont l’hypothèse nulle est que les résultats observés après l’expérimentation sont indépendants de la session. N’ayant aucune *p-value* inférieure à 5%, nous en déduisons qu’il n’y a pas de différence significative aux résultats de ce test entre les sessions.

Le nouveau protocole nous permet de conclure plus finement que pour la première session d’expérimentations. Lorsque l’on s’intéresse au score total, on remarque que 52% de la population est “touchée” par le mal du simulateur. On remarque cependant que le mal le plus rapporté est la fatigue oculaire perçue par 39% des participants et qu’une partie non négligeable de la population (20% sur l’ensemble des maux) a rapporté se sentir mieux à la fin qu’au début des expérimentations. Notamment un participant qui est arrivé en se sentant mal dans l’ensemble et qui est reparti 45 minutes plus tard en se sentant un peu mieux (cela étant à notre avis essentiellement lié au temps, plus qu’à une quelconque vertu bénéfique de la réalité virtuelle).

Variable	Inconfort général	Mal de tête	Fatigue oculaire	Difficulté à se concentrer	Nausée	Vertiges
Moyenne session 1	0.83	0.17	1.00	0.56	0.06	0.5
Moyenne session 2	0.56	0.68	1.34	0.73	0.27	0.44
<i>p-value</i> (test χ^2)	0.20	0.62	0.26	0.68	0.64	0.43
Différence moyenne session 2	0.24	0.32	0.49	-0.12	0.20	0.41
Proportion de la population “touchée”	28.8 %	23.7 %	39 %	18.6 %	15.3 %	22 %
Moyenne population “touchée”	1.76	2.21	2.7	1.91	1.78	2
Proportion de la population “soignée”	8.5 %	8.5 %	22 %	18.6 %	3.4 %	1.7 %
Moyenne population “soignée”	0	0.6	0.77	0.45	0	0

TABLE 5.2 – Tableau récapitulatif des réponses au questionnaire sur le mal du simulateur (RSSQ, [Kim et al.(2004)]). Les participants ont indiqué sur une échelle de Likert à 7 points le degré ressenti pour les différents maux du simulateur (0 signifie qu'ils ne l'ont pas ressenti, 6 qu'ils l'ont fortement ressenti). Les lignes Moyenne sessions 1 et 2 donnent les valeurs pour le questionnaire post-expérimentation. Les lignes ne mentionnant pas la session proviennent toutes de la session 2. La *p-value* est celle du test χ^2 dont l'hypothèse nulle est que les résultats observés sont indépendants de la session (*p-value* > 0.05 signifie qu'il n'y a pas de différence significative observée entre les deux sessions). La population “touchée” correspond aux participants ayant rapporté une valeur supérieure au questionnaire post-expérimentation à celle du questionnaire pré-expérimentation. Inversement la population “soignée” correspond à ceux qui ont rapporté se sentir mieux à la fin qu'au début. Le reste de la population correspond à ceux n'ayant pas rapporté de différence entre les deux.

FIGURE 5.9 – Résultats pour le mal du simulateur pour la session 2 ($n=59$)

Différence entre le ressenti avant et après l'utilisation de Meca3D, plus la différence est faible moins le mal du simulateur a été ressenti.

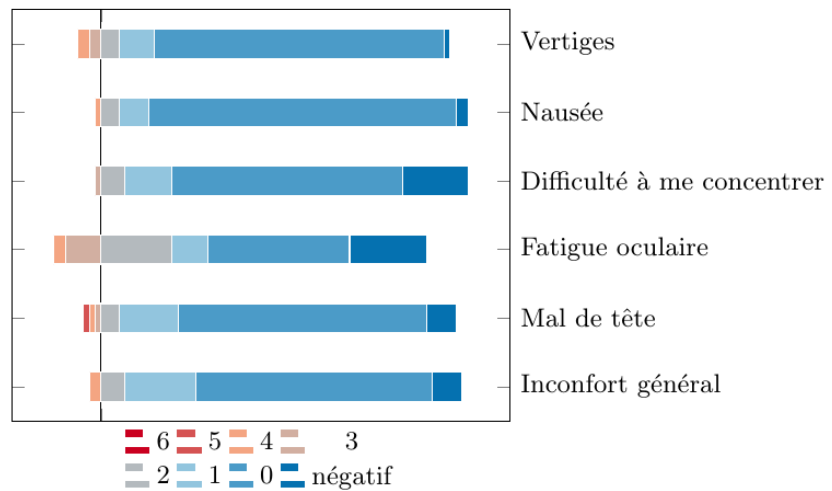
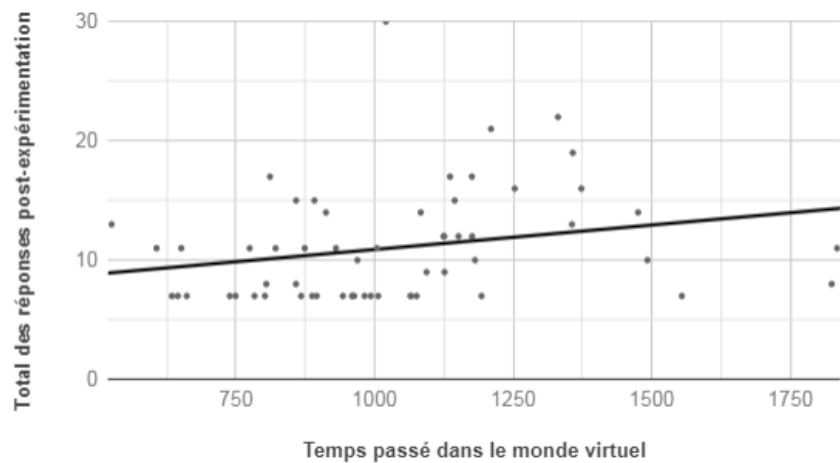


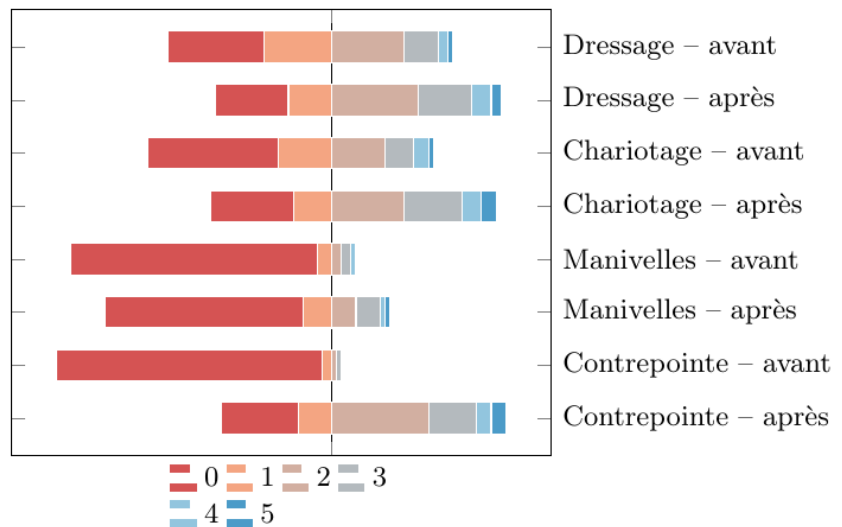
FIGURE 5.10 – Résultat du questionnaire RSSQ en fonction du temps passé dans le monde virtuel pour la session 2 ($n=59$)



Si de futures expérimentations étaient conduites sur le mal du simulateur, il pourrait être intéressant de faire remplir le questionnaire plusieurs fois pendant l'expérimentation afin de pouvoir évaluer l'évolution du mal du simulateur en fonction du temps. Ce protocole a été utilisé dans [Serge & Moss(2015)], où les auteurs ont fait remplir une version du RSSQ avant l'expérimentation, au milieu de l'expérimentation entre deux sessions de 8 minutes et à la fin. Ils observent une dégradation linéaire de la moyenne du total des observations qui passe de 4.83 avant le début à 12.00 après 8 minutes et de 24.75 après 16 minutes d'immersion en réalité virtuelle. Nous observons de notre côté une évolution de 2.47 avant l'expérience à 4.1 après en un temps moyen de 17 minutes. La figure 5.10 montre les résultats au questionnaire RSSQ en fonction du temps passé en immersion. Le courbe de tendance observée est croissante, mais la pente est bien plus faible que celle observée dans [Serge & Moss(2015)].

Pour une durée d'immersion aussi courte, il semblerait que le mal du simulateur généré soit de l'ordre du raisonnable, particulièrement comparé aux chiffres obtenus dans [Serge & Moss(2015)] qui observent une multiplication par 5 du résultat total du questionnaire

FIGURE 5.11 – Résultats questions de cours pour la session 2 ($n=59$)



pour une durée équivalente à la nôtre. Nous pensons que cette différence vient en partie du matériel de réalité virtuelle utilisé, plus performant que celui de l'étude citée, ainsi en partie qu'au contenu proposé qui a été pensé pour réduire mal du simulateur au minimum. Cependant, il reste à étudier l'impact de l'immersion sur des temps plus longs et récurrents.

5.5.3 Questions de cours

Pour la deuxième session, des questions de cours ont été ajoutées aux questionnaires pré-test et post-test, ces questions de cours étaient les mêmes au début et à la fin et nous permettent de comparer l'évolution des connaissances des étudiants sur les quatre questions posées. Ces questions se rapportent aux procédures de dressage, de chariotage et de réglage de la contre-pointe ainsi qu'au vocabulaire utilisé pour décrire les manivelles du tour conventionnel.

La figure 5.11 montre les notes obtenues par les étudiants avant et après avoir utilisé l'application. Les participants sont des étudiants de deuxième année d'IUT GMP qui sont censés connaître préalablement à l'expérimentation les procédures de dressage et de chariotage, ainsi que le nom des manivelles d'un tour conventionnel. Cependant nous observons qu'une partie non négligeable de cette population a donné des réponses fausses ou incomplètes aux questions de cours pré-test. En outre, nous n'observons qu'une faible amélioration des résultats, probablement du fait qu'une partie non négligeable des étudiants a donné des réponses identiques aux pré- et post- tests.

En revanche, les participants n'étaient pas censés connaître la procédure de réglage de la contre-pointe en arrivant. Or, sur cette question, nous notons une amélioration significative des notes obtenues par les étudiants après avoir utilisé Meca3D.

5.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des expérimentations menées avec Meca3D. Les résultats obtenus nous permettent de conclure positivement suivant deux axes de succès proposés par André Tricot dans [Tricot(2007)] : l'utilisabilité et l'acceptabilité. De plus, nous avons avancé sur le troisième facteur, l'utilité, en obtenant au travers de questionnaires sur l'expérience utilisateurs de bon résultats pour l'utilité perçue par les enseignants et les étudiants qui n'attendent que plus de contenu pour pouvoir l'utiliser dans des formations réelles.

6

Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

La problématique traitée dans ce manuscrit est celle de l'utilisation de la RV pour la formation au génie mécanique, et en particulier à l'utilisation de machine-outils. Notre intérêt s'est porté sur la conception d'une telle application en mettant au premier plan les métaphores d'interaction ainsi que les métriques à utiliser pour évaluer le résultat obtenu.

Cette méthodologie a été appliquée pour réaliser une application fonctionnelle et utilisable appelée Meca3D, testée avec des étudiants et des professionnels du domaine du génie mécanique. Les résultats de ces expérimentations nous ont permis de conclure très positivement sur deux des trois facteurs de succès des application à visée éducative : l'utilisabilité et l'acceptabilité ; tout en nous donnant des éléments encourageants pour le troisième point : l'utilité.

L'utilité dans notre cadre correspond à la capacité d'étendre les connaissances en génie mécanique de l'utilisateur. Les résultats discutés partie 5.5.3 sont un premier pas dans cette direction mais nous ne notons qu'une faible amélioration des réponses données aux questions posées pour trois des quatre axes sur lequel les participants ont été interrogés. Comme mentionné précédemment, cela peut être lié au fait que les étudiants étaient déjà sensés connaître les réponses à ces trois questions. Cependant, sur ces points, beaucoup d'étudiants n'ont pas donné de réponse satisfaisante avant l'expérimentation et ont répondu la même chose après le passage alors que sur la dernière question à propos d'une manipulation qu'ils ne connaissaient pas, la plupart des étudiants ont retenu au moins une partie de la procédure. L'un des étudiants a expliqué qu'il n'avait acquis que peu de connaissances durant l'expérience parce qu'il était focalisé sur la nouveauté de la RV et la vraisemblance de l'environnement dans lequel il était immergé. C'est un sentiment qui est ressorti dans les discussions avec plusieurs étudiants qui n'étaient pas prêts à se faire évaluer après une première expérience immersive.

L'évaluation des participants peut être intégrée directement dans l'application au travers de challenges ou de défis techniques, la plupart des objectifs proposés aux étudiants pour cette phase d'expérimentation ayant été simplifiés par une grande tolérance du scénario au niveau des réglages. Cela afin d'éviter d'interrompre le participant dans sa découverte de l'atelier virtuel.

Finalement, l'étape suivante dans l'évaluation de l'apport des connaissances serait de commencer par renforcer les procédures enseignées par la répétition dans différentes conditions initiales ainsi que l'augmentation de la difficulté des activités pour forcer l'étudiant à s'impliquer plus fortement dans les tâches à effectuer et de coupler cela à une évaluation des connaissances acquises sur machine réelle. Cela pourrait par exemple se faire pour la tâche de réglage de la contre-pointe en comparant le temps de complétion du réglage sur machine réelle d'étudiants avec une expérience virtuelle avec le temps pour des étudiants sans cette expérience ou avec une expérience acquise de façon traditionnelle.

6.2 Pistes d'améliorations

6.2.1 Design sonore

Le son est un élément important de tout environnement virtuel qui est malheureusement trop souvent négligé. Dans notre cas Meca3D a été réalisé en privilégiant d'autres axes de recherche au détriment de l'aspect sonore de l'environnement virtuel. En pratique, l'utilisation d'écouteurs n'est pas nécessaire pour cette première version. En effet il n'existe que quelques sons utilisés pour la rétroaction, la part principale de la rétroaction étant visuelle. En outre, lorsque le robot assistant parle pour expliquer une manipulation, ce qu'il dit est également présenté à textuellement dans une bulle au dessus de sa tête.

Dans la pratique les expérimentations ayant été réalisées dans un atelier de génie mécanique, l'absence de son d'ambiance dans l'application a été mitigé par celui du monde réel. Au delà du son d'ambiance, il faudrait aussi proposer des sons de rétroactions liés aux différentes manipulations effectuées. Ces sons sont importants pour l'immersion du participant mais peuvent aussi présenter un intérêt réel pour leur formation. En effet, l'usinage d'une pièce est une opération bruyante et le son produit est une information importante pour l'opérateur, qui lui permet d'ajuster les conditions de coupe afin de prévenir des problèmes d'usinages. Le son est donc un paramètre qu'il nous faudra intégrer dans nos prochains travaux sur l'immersion des apprenants.

6.2.2 Leviers d'apprentissage et game design

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, les mécaniques (de jeu, d'interaction avec le monde) mises en places sont utilisées pour soutenir l'aspect pédagogique d'un jeu d'apprentissage immersif. De plus, l'objectif du *game design* est d'utiliser ces mécaniques afin de provoquer une sensation de *flow* chez l'apprenant créant chez lui une motivation personnelle. Cette sensation requiert l'équilibrage des mécaniques et du scénario du jeu d'apprentissage au travers d'expérimentations avec des utilisateurs finaux pour affiner la difficulté du jeu et maintenir les utilisateurs intéressés.

À ce stade du projet, le scénario de Meca3D est amené à évoluer pour ajouter du contenu et des activités. Ainsi les briques proposées et testées dans ce manuscrit devront être redéployées dans d'autres cadres notamment en proposant des branches alternatives en cas d'erreur ainsi qu'un meilleur suivi des différentes actions de l'utilisateur pour proposer un débriefing pertinent (et faciliter l'apprentissage expérientiel). Ces branches

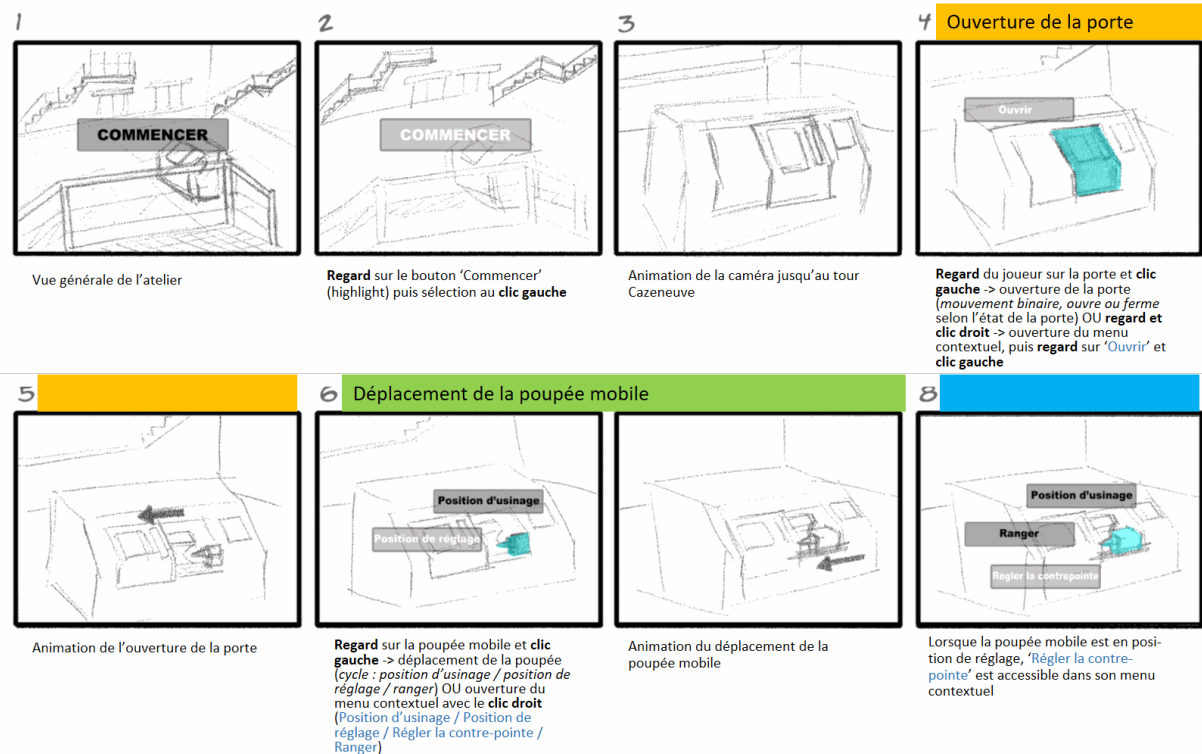
alternatives pourront permettre à l'étudiant de découvrir des situations dégradées sans risque pour sa personne ou pour le matériel.

A

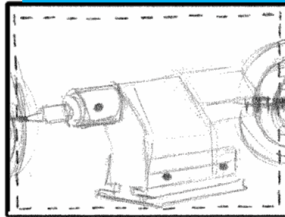
Storyboard originel de Meca3D

Des travaux, effectués par Catherine Pons Lelardeux de l'IRIT et Stéphane Segonds de l'ICA, ont permis de représenter l'activité professionnelle d'un opérateur de machine outil à commande numérique (MOCN) : activité de réglage d'une MOCN en activité interactive dans un environnement virtuel de formation 3D temps réel avec interaction clavier-souris. Le travail de représentation de la contre pointe, de modélisation de la procédure de réglage sur une machine réelle a permis la transcription de compétences métiers en activités scénarisées. Le travail d'animation et de mise en scène des objets 3D a été effectué par Cyrielle Guimbal.

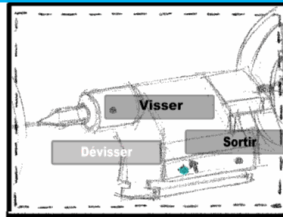
Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse a consisté à porter ces concepts dans un environnement de réalité virtuelle pour en faire une expérience pédagogique immersive.



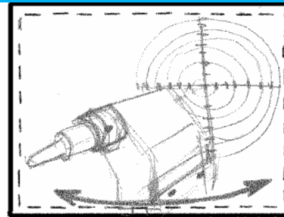
1 Réglage de la contrepointe



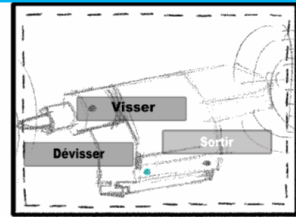
Animation pour obtenir une vue élargie zoomée de la poupée mobile
Apparition des cibles et des faisceaux lumineux



Regard sur une vis puis molette vers l'avant (visse) / vers l'arrière (dévisse) OU ouverture du menu contextuel avec le clic droit puis clic gauche long sur 'Visser' ou 'Dévisser'

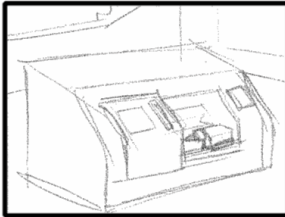


Rotation de la tête permet de visualiser les cibles positionnées de chaque côté de la poupée mobile

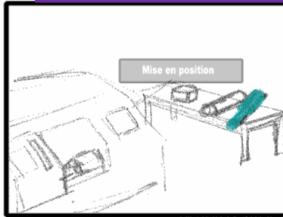


Regard sur une vis et clic droit -> ouverture du menu contextuel 'Sortir' (sélection au clic gauche)

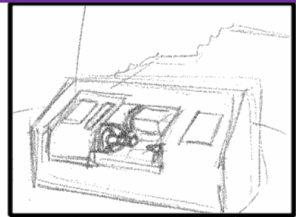
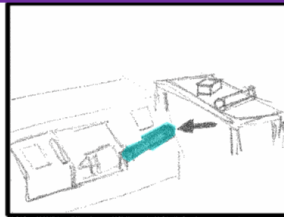
5 Mise en Position de la pièce



Animation dézoom

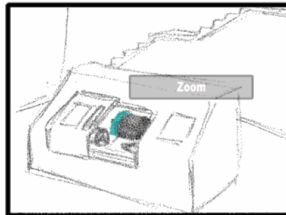


Regard sur une pièce à usiner posée sur la table à côté du tour, clic gauche, glissé/déposé sur la machine OU ouverture du menu contextuel de la pièce avec le clic droit puis 'Mise en position'



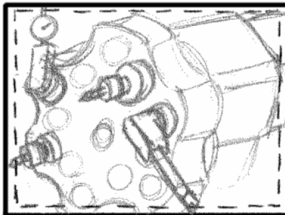
Au lâcher du clic: la pièce est placée correctement sur la machine (retour visuel: clignotement de la pièce)

1



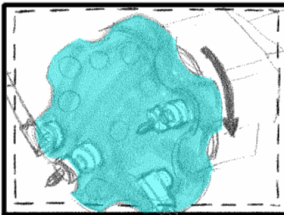
Regard sur la tourelle et clic droit: menu contextuel 'Zoom'

2



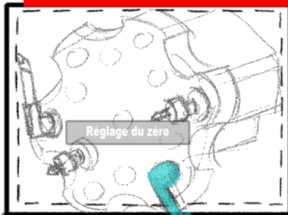
Vue éclatée de la tourelle

3



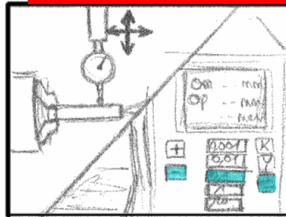
Regard sur la tourelle et molette -> changement d'outil
Mouvement de rotation de la tourelle

4 Réglage du zéro



Lorsque le palpeur est bien positionné (rotation de la tourelle avec la molette OU ouverture du menu contextuel du palpeur puis 'Appel de l'outil') -> 'Réglage du zéro' est accessible dans son menu contextuel

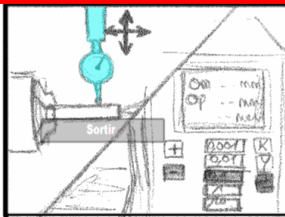
5



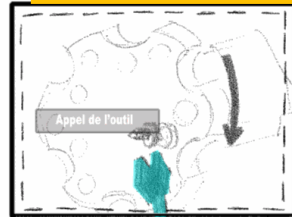
Vue sur le palpeur et les commandes numériques

Regard et clic gauche pour taper sur les touches du clavier

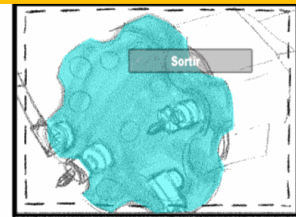
7 Usinage



Ouverture du menu contextuel du palpeur: 'Sortir' -> retour à la vue précédente (vue sur la tourelle)

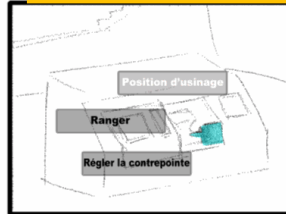


Regard sur la tourelle puis molette jusqu'à bien positionner l'outil OU regard sur l'outil et clic droit pour ouvrir son menu contextuel: 'Appel de l'outil'

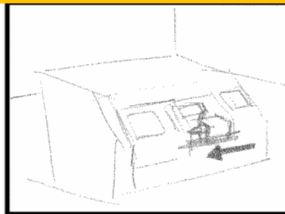


Ouverture du menu contextuel de la tourelle: 'Sortir'

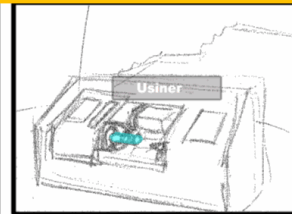
1 Usinage



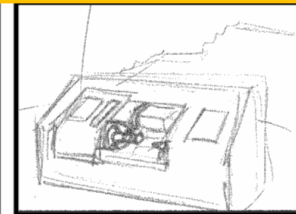
Regard + clic gauche sur la poupée mobile OU ouverture du menu contextuel avec le clic droit 'Position d'usinage'



Animation du déplacement de la poupée mobile



Lorsque la poupée mobile est en position d'usinage -> 'Usiner' est accessible dans le menu contextuel de la pièce



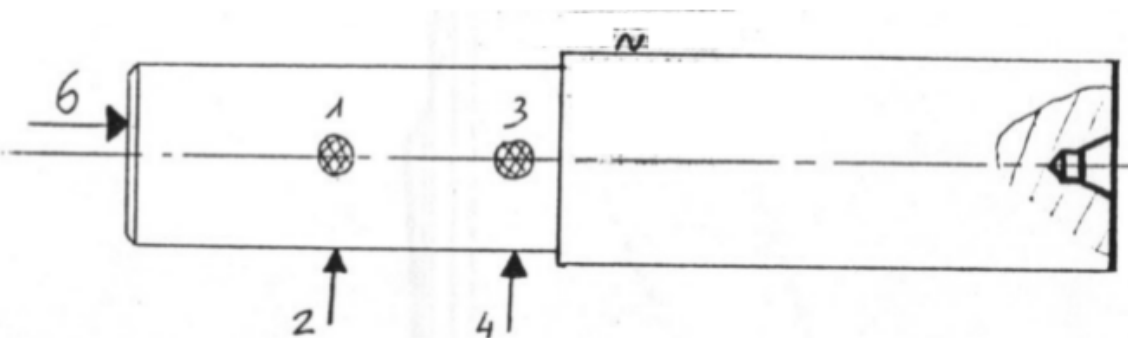
Animation de l'usinage (rotation de la pièce) puis CONTRÔLE et AFFICHAGE DES DÉFAUTS

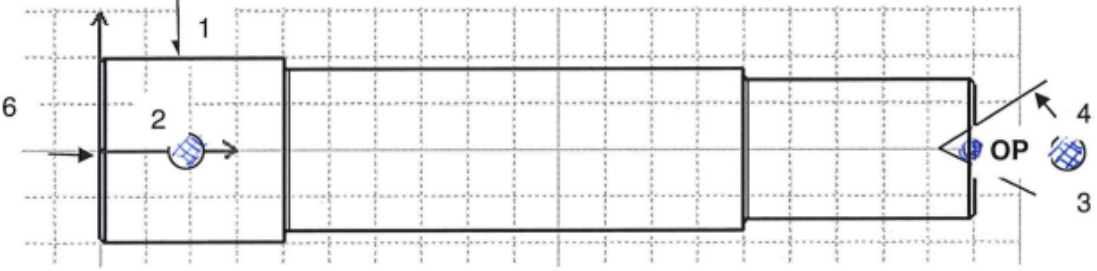
B

Contrat de phase

Un contrat de phase décrivant les opérations à réaliser dans l'atelier virtuel de Meca3D a été réalisé. Le scénario pédagogique proposé guide l'opérateur au travers des phases 20 et 40 de ce contrat et impose le réglage de la contre-pointe et du zéro du tour à commande numérique.

PHASE N : 20		AVANT-PROJET N° D'ETUDE DE FABRICATION			
Etabli par : N. Muller	Elément : Epreuve pratique 1	N°: EP1			
Le : 23/11/2018	Sous-ensemble : XXXXXXXXXX	Matière : C35			
Programme : Lot de 10 pièces	Ensemble : Essais NF E60102	Brut : Rond Ø 40 HB190, état recuit			
Désignation : Dressage Chariotage Chanfreinage					
Machine-outil : Tour conventionnel					
DESIGNATION DES OPERATIONS		OUTILS	Paramètres de coupe		
			Vc	fz	ap
201 : Dresser	F	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	
202 : Charioter Ø 35 +/- 0,1	F	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	
203 : Chanfreiner	F	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	

PHASE N : 30		AVANT-PROJET N° D'ETUDE DE FABRICATION			
Etabli par : N. Muller	Elément : Epreuve pratique 1	N°: EP2			
Le : 23/11/2018	Sous-ensemble : XXXXXXXXXX	Matière : C35			
Programme : Lot de 10 pièces	Ensemble : Essais NF E60102	Brut : Rond Ø 40 HB190, état recuit			
Désignation : Dressage centrage					
Machine-outil : Tour conventionnel					
					
DESIGNATION DES OPERATIONS		OUTILS	Paramètres de coupe		
			Vc (m/mn)	Fz (mm/tr)	Ap (mm)
301 : Dresser	E	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	
302 : Dresser	F	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	
303 : Centrer	F	Foret à centrer	20	0,05	

PHASE N : 40		AVANT-PROJET N° D'ETUDE DE FABRICATION			
Etabli par : N. Muller	Elément : Epreuve pratique 3	N°: EP3			
Le : 23/11/2018	Sous-ensemble : XXXXXXXXXXXX	Matière : C35			
Programme : Lot de 10 pièces	Ensemble : Essais NF E60102	Brut : Rond Ø 40 HB190, état recuit			
Désignation : Contournage					
Machine-outil : Tour CN Cazeneuve					
Montage mixte					
					
DESIGNATION DES OPERATIONS		OUTILS	Paramètres de coupe		
			Vc	fz	ap
401 : Cycle de chariotage paraxial à Z	E	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T308H10	200	0,1	
402 : Contournage	½ F	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	
403 : Contournage	F	SCLCR 2020H09 & plaq CCGX09T3081810	200	0,1	

Bibliographie

- [Achibet et al.(2014)] Merwan Achibet, Maud Marchal, Ferran Argelaguet, & Anatole Lécuyer. The virtual mitten : A novel interaction paradigm for visuo-haptic manipulation of objects using grip force. In *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 59–66. IEEE (2014).
- [Alvarez(2007)] Julian Alvarez. *Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle*. Ph.D. thesis, Toulouse 2 (2007).
- [Anderson & Bushman(2001)] Craig A Anderson & Brad J Bushman. Effects of violent video games on aggressive behavior, aggressive cognition, aggressive affect, physiological arousal, and prosocial behavior : A meta-analytic review of the scientific literature. *Psychological science* 12(5) :353–359 (2001).
- [Argelaguet & Andujar(2009)] Ferran Argelaguet & Carlos Andujar. Efficient 3d pointing selection in cluttered virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications* 29(6) :34–43 (2009).
- [Argelaguet & Andujar(2013)] Ferran Argelaguet & Carlos Andujar. A survey of 3d object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics* 37(3) :121–136 (2013).
- [Bacim et al.(2013)] Felipe Bacim, Regis Kopper, & Doug A Bowman. Design and evaluation of 3d selection techniques based on progressive refinement. *International Journal of Human-Computer Studies* 71(7) :785–802 (2013).
- [Barot et al.(2013)] Camille Barot, Domitile Lourdeaux, J-M Burkhardt, Kahina Amokrane, & Dominique Lenne. V3s : A virtual environment for risk-management training based on human-activity models. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 22(1) :1–19 (2013).
- [Bhagat et al.(2016)] Kaushal Kumar Bhagat, Wei-Kai Liou, & Chun-Yen Chang. A cost-effective interactive 3d virtual reality system applied to military live firing training. *Virtual Reality* 20(2) :127–140 (2016).
- [Blome et al.(2017)] Tim Blome, Alexander Diefenbach, Stefan Rudolph, Kristina Bucher, & Sebastian von Mammen. Vreanimate—non-verbal guidance and learning in virtual reality. In *Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games), 2017 9th International Conference on*, pp. 23–30. IEEE (2017).
- [Boletsis(2017)] Costas Boletsis. The new era of virtual reality locomotion : A systematic literature review of techniques and a proposed typology. *Multimodal Technologies and Interaction* 1(4) :24 (2017).

- [Bowman et al.(2001a)] Doug Bowman, Chadwick Wingrave, Joshua Campbell, & Vinh Ly. Using pinch gloves (tm) for both natural and abstract interaction techniques in virtual environments (2001a).
- [Bowman et al.(2006)] Doug A Bowman, Jian Chen, Chadwick A Wingrave, John F Lucas, Andrew Ray, Nicholas F Polys, Qing Li, Yonca Haciahmetoglu, Ji-Sun Kim, Seonho Kim, et al. New directions in 3d user interfaces. *IJVR* 5(2) :3–14 (2006).
- [Bowman et al.(1999)] Doug A Bowman, Elizabeth T Davis, Larry F Hodges, & Albert N Badre. Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment. *Presence* 8(6) :618–631 (1999).
- [Bowman & Hodges(1997)] Doug A Bowman & Larry F Hodges. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, pp. 35–ff. ACM (1997).
- [Bowman & Hodges(1999)] Doug A Bowman & Larry F Hodges. Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive virtual environments. *Journal of Visual Languages & Computing* 10(1) :37–53 (1999).
- [Bowman et al.(2001b)] Doug A Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J LaViola Jr, & Ivan Poupyrev. An introduction to 3-d user interface design. *Presence : Teleoperators and virtual environments* 10(1) :96–108 (2001b).
- [Bowman(1999)] Douglas A Bowman. *Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments*. Ph.D. thesis, Citeseer (1999).
- [Boyle et al.(2011)] Elizabeth Boyle, Thomas M. Connolly, & Thomas Hainey. The role of psychology in understanding the impact of computer games. *Entertainment Computing* 2(2) :69 – 74. Serious Games Development and Applications (2011).
- [Buche(2005)] Cédric Buche. *Un système tutoriel intelligent et adaptatif pour l'apprentissage de compétences en environnement virtuel de formation*. Ph.D. thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest (2005).
- [Cameron & Dwyer(2005)] Brian Cameron & Francis Dwyer. The effect of online gaming, cognition and feedback type in facilitating delayed achievement of different learning objectives. *Journal of Interactive Learning Research* 16(3) :243–258 (2005).
- [Chen(2007)] Jenova Chen. Flow in games (and everything else). *Communications of the ACM* 50(4) :31–34 (2007).
- [Chevaillier et al.(2012)] Pierre Chevaillier, Thanh-Hai Trinh, Mukesh Barange, Pierre De Loor, Frédéric Devillers, Julien Soler, & Ronan Querrec. Semantic modeling of virtual environments using mascaret. In *2012 5th Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS)*, pp. 1–8. IEEE (2012).
- [Chou(2015)] Yu-kai Chou. *Actionable gamification : Beyond points, badges, and leaderboards*. Octalysis Group (2015).
- [Cloudhead Games(2016)] Cloudhead Games. The gallery (episode 1) – call of the star-seed (2016).

- [Connolly et al.(2012)] Thomas M Connolly, Elizabeth A Boyle, Ewan MacArthur, Thomas Hainey, & James M Boyle. A systematic literature review of empirical evidence on computer games and serious games. *Computers & Education* 59(2) :661–686 (2012).
- [Crison et al.(2005)] Franck Crison, Anatole Lecuyer, Daniel Mellet d’Huart, J-M Burkhardt, Georges Michel, & J-L Dautin. Virtual technical trainer : Learning how to use milling machines with multi-sensory feedback in virtual reality. In *Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE*, pp. 139–145. IEEE (2005).
- [Cruz-Neira et al.(1993)] Carolina Cruz-Neira, Daniel J Sandin, & Thomas A DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the cave. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 135–142. ACM (1993).
- [Csikszentmihalyi(1997)] Mihaly Csikszentmihalyi. Flow and the psychology of discovery and invention. *HarperPerennial, New York* 39 (1997).
- [Dawley & Dede(2014)] Lisa Dawley & Chris Dede. Situated learning in virtual worlds and immersive simulations. In *Handbook of research on educational communications and technology*, pp. 723–734. Springer (2014).
- [Deci & Ryan(2000)] Edward L Deci & Richard M Ryan. The” what” and” why” of goal pursuits : Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological inquiry* 11(4) :227–268 (2000).
- [Duval(2017)] Yohan Duval. *Création automatisée de Scénarios de Formation pour l’enseignement d’activités métier dans un environnement informatique modulaire*. Ph.D. thesis, Toulouse, INSA (2017).
- [Fenouillet et al.(2009)] Fabien Fenouillet, Jonathan Kaplan, & Nora Yennek. Serious games et motivation. In *4eme Conference francophone sur les Environnements Informatiques pour l’Apprentissage Humain (EIAH’09), vol. Actes de l’Atelier” Jeux Serieux : conception et usages* (2009).
- [Ferguson(2007)] Christopher John Ferguson. The good, the bad and the ugly : A meta-analytic review of positive and negative effects of violent video games. *Psychiatric Quarterly* 78(4) :309–316 (2007).
- [Fernandes & Feiner(2016)] Ajoy S Fernandes & Steven K Feiner. Combating vr sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *3D User Interfaces (3DUI), 2016 IEEE Symposium on*, pp. 201–210. IEEE (2016).
- [Foley et al.(1984)] James D Foley, Victor L Wallace, & Peggy Chan. The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE computer Graphics and Applications* 4(11) :13–48 (1984).
- [Fridman et al.(2015a)] Lex Fridman, Philipp Langhans, Joonbum Lee, & Bryan Reimer. Driver gaze estimation without using eye movement. *arXiv preprint arXiv :1507.04760* (2015a).
- [Fridman et al.(2015b)] Lex Fridman, Joonbum Lee, Bryan Reimer, & Trent Victor. ” owl” and” lizard” : Patterns of head pose and eye pose in driver gaze classification. *arXiv preprint arXiv :1508.04028* (2015b).

- [Galaup et al.(2015)] Michel Galaup, Frederic Segonds, Catherine Lelardeux, & Pierre Lagarrigue. Mecagenius : An innovative learning game for mechanical engineering. *International Journal of Engineering Education* 31(3) :786–797 (2015).
- [Gerbaud et al.(2008)] Stéphanie Gerbaud, Nicolas Mollet, Franck Ganier, Bruno Arnaldi, & Jacques Tisseau. Gvt : a platform to create virtual environments for procedural training. In *Virtual Reality Conference, 2008. VR'08. IEEE*, pp. 225–232. IEEE (2008).
- [Griffiths & Davies(2005)] Mark D Griffiths & Mark NO Davies. Videogame addiction : does it exist ? (2005).
- [Grissom et al.(1993)] Scott B Grissom, Gary Perlman, & Bolz Hall. Step (3d) : A portable discount usability evaluation plan for 3d interaction (1993).
- [Hainey et al.(2016)] Thomas Hainey, Thomas M Connolly, Elizabeth A Boyle, Amanda Wilson, & Aisya Razak. A systematic literature review of games-based learning empirical evidence in primary education. *Computers & Education* 102 :202–223 (2016).
- [Hamari et al.(2016)] Juho Hamari, David J Shernoff, Elizabeth Rowe, Brianno Coller, Jodi Asbell-Clarke, & Teon Edwards. Challenging games help students learn : An empirical study on engagement, flow and immersion in game-based learning. *Computers in Human Behavior* 54 :170–179 (2016).
- [Hard Light Labs(2017)] Hard Light Labs. “soundstage” (2017).
- [Harris et al.(2014)] Alyssa Harris, Kevin Nguyen, Preston Tunnell Wilson, Matthew Jankoski, & Betsy Williams. Human joystick : Wii-leaning to translate in large virtual environments. In *Proceedings of the 13th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, pp. 231–234. ACM (2014).
- [Herrington & Oliver(2000)] Jan Herrington & Ron Oliver. An instructional design framework for authentic learning environments. *Educational technology research and development* 48(3) :23–48 (2000).
- [Heutte(2017)] Jean Heutte. L’environnement optimal d’apprentissage : contribution de la recherche empirique sur les déterminants psychologiques de l’expérience positive subjective aux sciences de l’éducation et de la formation des adultes. *Sciences et bonheur* (2) :82–99 (2017).
- [Hidi & Renninger(2006)] Suzanne Hidi & K Ann Renninger. The four-phase model of interest development. *Educational psychologist* 41(2) :111–127 (2006).
- [Hill & Howarth(2000)] KJ Hill & Peter A Howarth. Habituation to the side effects of immersion in a virtual environment. *Displays* 21(1) :25–30 (2000).
- [Hoareau et al.(2017)] Charlotte Hoareau, Ronan Querrec, Cédric Buche, & Franck Ganier. Evaluation of internal and external validity of a virtual environment for learning a long procedure. *International Journal of Human-Computer Interaction* 33(10) :786–798 (2017).
- [Huguet et al.(2016)] Lauriane Huguet, Nicolas Sabouret, & Domitile Lourdeaux. Simuler des erreurs de communication au sein d’une équipe d’agents virtuels en situation de crise. In *Rencontres des jeunes chercheurs en Intelligence Artificielle (RFIA 2016)* (2016).

- [Jauregui et al.(2014)] David Antonio Gomez Jauregui, Ferran Argelaguet, Anne-Helene Olivier, Maud Marchal, Franck Multon, & Anatole Lecuyer. Toward “pseudo-haptic avatars” : Modifying the visual animation of self-avatar can simulate the perception of weight lifting. *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 20(4) :654–661 (2014).
- [Kallmann & Thalmann(1999)] Marcelo Kallmann & Daniel Thalmann. Direct 3d interaction with smart objects. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 124–130. ACM (1999).
- [Kim et al.(2004)] DH Kim, DE Parker, & MY Park. A new procedure for measuring simulator sickness—the rssq. *Seattle, WA : Human Interface Technology Laboratory, University of Washington* (2004).
- [Kolb(1984)] David Kolb. *Experiential learning as the science of learning and development* (1984).
- [Lelardeux et al.(2016)] Catherine Lelardeux, David Panzoli, Vincent Lubrano, Vincent Minville, Pierre Lagarrigue, & Jean-Pierre Jessel. Communication system and team situation awareness in a multiplayer real-time learning environment : application to a virtual operating room. *The Visual Computer* (2016).
- [Leroy et al.(2012)] Laure Leroy, Philippe Fuchs, & Guillaume Moreau. Real-time adaptive blur for reducing eye strain in stereoscopic displays. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 9(2) :9 (2012).
- [Lin & Parker(2007)] James JW Lin & Donald E Parker. User experience modeling and enhancement for virtual environments that employ wide-field displays. In *International Conference on Digital Human Modeling*, pp. 423–433. Springer (2007).
- [Loh(2007)] Christian Sebastian Loh. Designing online games assessment as : Information trails. In *Games and simulations in online learning : Research and development frameworks*, pp. 323–348. IGI Global (2007).
- [Lourdeaux et al.(2017)] Domitile Lourdeaux, Azzeddine Benabbou, Lauriane Huguet, & Rémi Lacaze-Labadie. HUMANS : suite logicielle pour la scénarisation d’environnements virtuels pour la formation à des situations socio-techniques complexes. In *3ème Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l’Intelligence Artificielle, APIA 2017, Caen, France, July 3-4, 2017.*, pp. 61–68 (2017).
- [Malone(1987)] Thomas W Malone. Making learning fun : A taxonomic model of intrinsic motivations for learning. *Conative and affective process analysis* (1987).
- [McCauley et al.(1976)] Michael E McCauley, Jackson W Royal, C Dennis Wylie, James F O’Hanlon, & Robert R Mackie. Motion sickness incidence : Exploratory studies of habituation, pitch and roll, and the refinement of a mathematical model. Tech. rep., Canyon Research Group Inc Goleta Ca Human Factors Research Div (1976).
- [Mele & Federici(2012)] Maria Laura Mele & Stefano Federici. Gaze and eye-tracking solutions for psychological research. *Cognitive Processing* 13(1) :261–265 (2012).
- [Merhi et al.(2007)] Omar Merhi, Elise Faugloire, Moira Flanagan, & Thomas A Stoffregen. Motion sickness, console video games, and head-mounted displays. *Human Factors* 49(5) :920–934 (2007).

- [Moon(2013)] Jennifer A Moon. *Reflection in learning and professional development : Theory and practice*. Routledge (2013).
- [Mori et al.(2012)] Masahiro Mori, Karl F MacDorman, & Norri Kageki. The uncanny valley [from the field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19(2) :98–100 (2012).
- [Muller et al.(2016)] Nicolas Muller, Théo de la Hogue, Pierre Lagarrigue, David Panzoli, & Jean-Pierre Jessel. Albi vu d'en haut : démonstration d'une méthode de sélection au regard pour casque de réalité virtuelle. In *Actes - Journées d'Informatique Musicale 2016*, pp. 223–224 (2016).
- [Muller et al.(2017)] Nicolas Muller, David Panzoli, Michel Galaup, Pierre Lagarrigue, & Jean-Pierre Jessel. Learning mechanical engineering in a virtual workshop : A preliminary study on utilisability, utility and acceptability. In *2017 9th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, pp. 55–62. IEEE (2017).
- [Nagendran et al.(2013)] Myura Nagendran, Kurinchi Selvan Gurusamy, Rajesh Aggarwal, Marilena Loizidou, & Brian R Davidson. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *The Cochrane Library* (2013).
- [Nescher et al.(2014)] Thomas Nescher, Ying-Yin Huang, & Andreas Kunz. Planning re-direction techniques for optimal free walking experience using model predictive control. In *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 111–118. IEEE (2014).
- [Northway Games and Radial Games(2016)] Northway Games and Radial Games. *Fantastic contraptions* (2016).
- [Oculus(2016)] Oculus. Oculus first contact (2016).
- [Ogletree & Drake(2007)] Shirley Matile Ogletree & Ryan Drake. College students' video game participation and perceptions : Gender differences and implications. *Sex Roles* 56(7-8) :537–542 (2007).
- [Orvis et al.(2008)] Karin A Orvis, Daniel B Horn, & James Belanich. The roles of task difficulty and prior videogame experience on performance and motivation in instructional videogames. *Computers in Human behavior* 24(5) :2415–2433 (2008).
- [Panzoli et al.(2016)] David Panzoli, Catherine Pons Lelardeux, Michel Galaup, Pierre Lagarrigue, Vincent Minville, & Vincent Lubrano. Interaction and communication in an immersive learning game : the challenges of modelling real-time collaboration in a virtual operating room. In Minhua Ma (ed.), *Serious Games and Edutainment Applications, 2nd Ed.* Springer (2016).
- [Podwal et al.(2016)] Mike Podwal, Manuel Clément, Stefan Welker, & Robbie Tilton. Daydream labs : Lessons learned from vr prototyping - google i/o 2016. *Récupéré sur <https://www.youtube.com/watch?v=lGUmTQgbiAY>* (2016).
- [Pons-Lelardeux et al.(2015)] C Pons-Lelardeux, M Galaup, F Segonds, & P Lagarrigue. Didactic study of a learning game to teach mechanical engineering. *Procedia engineering* 132 :242–250 (2015).
- [Poole & Ball(2006)] Alex Poole & Linden J Ball. Eye tracking in hci and usability research. In *Encyclopedia of human computer interaction*, pp. 211–219. IGI Global (2006).

- [Poupyrev et al.(1996)] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, & Tadao Ichikawa. The go-go interaction technique : non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 79–80. ACM (1996).
- [Poupyrev & Ichikawa(1999)] Ivan Poupyrev & Tadao Ichikawa. Manipulating objects in virtual worlds : Categorization and empirical evaluation of interaction techniques. *Journal of Visual Languages & Computing* 10(1) :19–35 (1999).
- [Poupyrev et al.(1997)] Ivan Poupyrev, Suzanne Weghorst, Mark Billinghurst, & Tadao Ichikawa. A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive vr. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 21–28. ACM (1997).
- [Querrec(2010)] Ronan Querrec. *Apprentissage de procédures en environnements virtuels*. Ph.D. thesis, Université Européenne de Bretagne (2010).
- [Reason & Brand(1975)] James T Reason & Joseph John Brand. *Motion sickness*. Academic press (1975).
- [Rose et al.(2000)] FD Rose, Elizabeth A Attree, BM Brooks, DM Parslow, & PR Penn. Training in virtual environments : transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics* 43(4) :494–511 (2000).
- [Serge & Moss(2015)] Stephen R Serge & Jason D Moss. simulator sickness and the oculus rift : A first look. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 59, pp. 761–765. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA (2015).
- [Sherstyuk et al.(2012)] Andrei Sherstyuk, Arindam Dey, & Christian Sandor. *Head-turning approach to eye-tracking in immersive virtual environments*. IEEE (2012).
- [Shin et al.(2013)] Dong-Hee Shin, Frank Biocca, & Hyunseung Choo. Exploring the user experience of three-dimensional virtual learning environments. *Behaviour & Information Technology* 32(2) :203–214 (2013).
- [Smart Jr et al.(2002)] L James Smart Jr, Thomas A Stoffregen, & Benoît G Bardy. Visually induced motion sickness predicted by postural instability. *Human factors* 44(3) :451–465 (2002).
- [Smith & Graham(2006)] J David Smith & TC Graham. Use of eye movements for video game control. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, p. 20. ACM (2006).
- [Soukoreff & MacKenzie(2004)] William R Soukoreff & Scott I MacKenzie. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of fitts' law research in hci. *International journal of human-computer studies* 61(6) :751–789 (2004).
- [Steed(2006)] Anthony Steed. Towards a general model for selection in virtual environments. In *3D User Interfaces, 2006. 3DUI 2006. IEEE Symposium on*, pp. 103–110. IEEE (2006).
- [Stone et al.(2011)] Robert J Stone, Peter B Panfilov, & Valentin E Shukshunov. Evolution of aerospace simulation : From immersive virtual reality to serious games. In *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference on*, pp. 655–662. IEEE (2011).

- [Tcha-Tokey et al.(2015a)] Katy Tcha-Tokey, Emilie Loup-Escande, Olivier Christmann, Gaëlle Canac, Fabien Farin, & Simon Richir. Towards a user experience in immersive virtual environment model : a review. In *Proceedings of the 27th Conference on l'Interaction Homme-Machine*, p. 26. ACM (2015a).
- [Tcha-Tokey et al.(2015b)] Katy Tcha-Tokey, Emilie Loup-Escande, Olivier Christmann, Gaëlle Canac, Fabien Farin, & Simon Richir. Vers un modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif : une analyse de la littérature (2015b).
- [Tricot(2007)] André Tricot. Utility, usability and acceptability : an ergonomic approach to the evaluation of external representations for learning. In *12th Biennial Conference for Research on Learning and Instruction* (2007).
- [Valve(2016)] Valve. The lab (2016).
- [Whitfield(1989)] David Whitfield. Review of : "human factors in engineering and design," 6th edn. by m. s. sanders and e. j. mccormick. (new york : Mcgraw-hill, 1987.) [pp. viii + 664.] no price given. *Ergonomics* 32(5) :558–558 (1989).
- [Whittinghill et al.(2015)] David Matthew Whittinghill, Bradley Ziegler, T Case, & B Moore. Nasum virtualis : A simple technique for reducing simulator sickness. In *Games Developers Conference (GDC)* (2015).
- [Wilson et al.(2016)] Preston Tunnell Wilson, William Kalescky, Ansel MacLaughlin, & Betsy Williams. Vr locomotion : walking; walking in place; arm swinging. In *Proceedings of the 15th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry-Volume 1*, pp. 243–249. ACM (2016).
- [Yaman et al.(2008)] Melek Yaman, Claudia Nerdel, & Horst Bayrhuber. The effects of instructional support and learner interests when learning using computer simulations. *Computers & Education* 51(4) :1784 – 1794 (2008).
- [Yao et al.(2014)] Richard Yao, Tom Heath, Aaron Davies, Tom Forsyth, Nate Mitchell, & Perry Hoberman. Oculus vr best practices guide. *Oculus VR* (2014).
- [Zichermann & Cunningham(2011)] Gabe Zichermann & Christopher Cunningham. *Gamification by design : Implementing game mechanics in web and mobile apps.* " O'Reilly Media, Inc." (2011).
- [Zyda(2005)] M. Zyda. From visual simulation to virtual reality to games. *Computer* 38(9) :25–32 (2005).

Résumé

La thèse présentée dans ce manuscrit propose un cadre méthodologique pour l'élaboration et la validation d'un outil de formation au génie mécanique en réalité virtuelle. Elle s'inscrit dans les avancées récentes du domaine de la réalité virtuelle et s'intègre à la recherche sur les environnements virtuels pour l'apprentissage humain. Les travaux présentés se focalisent en particulier sur les modalités d'interaction spécifiques à mettre en oeuvre pour permettre à un opérateur de se former virtuellement à l'utilisation de machines-outils.

L'application de ces recherches donne lieu à la réalisation d'un prototype dans lequel les principaux résultats y sont illustrés et décrits à travers les étapes suivantes : la préparation d'un scénario pédagogique, les choix techniques et ergonomiques guidant le développement de l'application, la mise en place d'un environnement virtuel immersif et interactif pour l'apprentissage, et enfin la validation d'une telle application. Les expérimentations menées avec des enseignants et des étudiants en génie mécanique ont mis en évidence un grand intérêt pour l'outil proposé de la part des enseignants et ont permis de valider l'approche utilisée suivant les facteurs de succès des jeux d'apprentissages : utilisabilité, acceptabilité et utilité.

Mots-clés: Réalité virtuelle, IHM, Jeux sérieux

Abstract

The thesis presented in this manuscript offers a methodological framework used to design, implement and validate a virtual learning environment for mechanical engineering. It takes advantage of the recent advances in the domain of virtual reality to build upon existing research in the field of virtual environments for learning. This work is focused on specific interaction modalities leveraged in a virtual training for teaching learners to operate actual machine tools.

Application of this research leads to the development of a prototype in which the primary findings are illustrated and described through the following steps : preparation of a pedagogical scenario, technical and ergonomic choices guiding the implementation of the application, design of an immersive and interactive virtual environment for learning, and finally the validation of such an application. Experimentation with teachers and students in the field of mechanical engineering brought to light the genuine interest from the teachers for the tool they tested and allowed us to validate our approach upon the success factors for learning game : usability, acceptability and utility.

Keywords: Virtual reality, HCI, Serious games