



HAL
open science

Plateforme de réalité virtuelle Virtual Compagnon : Évaluation d'une solution haptique pour la formation aux gestes métiers

Mehdi Hafsia

► **To cite this version:**

Mehdi Hafsia. Plateforme de réalité virtuelle Virtual Compagnon : Évaluation d'une solution haptique pour la formation aux gestes métiers. Robotique [cs.RO]. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPASG066 . tel-03230195

HAL Id: tel-03230195

<https://theses.hal.science/tel-03230195>

Submitted on 19 May 2021

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.

Plateforme de réalité virtuelle
Virtual Compagnon: Évaluation
d'une solution haptique pour la
formation aux gestes métiers

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n° 580, Sciences et technologies de
l'information et de la communication (STIC)
Spécialité de doctorat: Robotique
Unité de recherche : Université Paris-Saclay, UVSQ, LISV, 78124,
Vélizy-Villacoublay, France
Réfèrent : Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines

**Thèse présentée et soutenue à Vélizy-Villacoublay le 8
décembre 2020, par**

Mehdi HAFSIA

Composition du jury:

Frédéric Magoulès Professeur, Université Paris-Saclay	Président
Jean-Marie Burkhardt Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel	Rapporteur
Patrick Henaff Professeur, Université de Lorraine, Mines Nancy	Rapporteur
Valérie Gouranton Maître de conférences, INSA Rennes	Examinatrice
Zoubeir Lafhaj Professeur, Centrale de Lille	Examineur
Eric Monacelli Professeur, Université Paris-Saclay	Directeur de thèse
Laure Ducoulombier Docteure Ingénieure, Bouygues Construction	Co-encadrante de thèse
Thiébault Clément Directeur R&D, Bouygues Construction	Invité

Titre : Plateforme de réalité virtuelle *Virtual Compagnon*: Évaluation d'une solution haptique pour la formation aux gestes métiers

Mots clés : Réalité virtuelle, retour de force, analyse de posture, formation, TMS, construction

Résumé : La construction figure parmi les secteurs les plus à risques en matière de santé et de sécurité. La sécurité sociale attribue plus de 14% des accidents recensés en 2018 au secteur du BTP. En plus des risques sur la sécurité, les compagnons sont exposés aux maladies professionnelles. Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont en tête de liste des maladies professionnelles les plus fréquentes. Afin de répondre à ces problématiques, les entreprises de construction ont mis en place une politique santé et sécurité afin de préserver la vie de leurs salariés. Cette politique prévoit, entre autres, une amélioration de l'aspect organisationnel du travail, l'adaptation du travail à l'homme et la formation. La formation se déroule selon une méthodologie classique : une formation théorique et une formation pratique. La formation représente des contraintes de coût, de durée et d'organisation. Le contenu doit s'adapter à des profils spécifiques, être répétable et permettre aux formateurs d'évaluer le niveau des stagiaires. Pour les formations aux bons gestes et à la bonne posture afin d'éviter les risques d'apparition de TMS,

l'impact d'une formation en réalité virtuelle (RV) est moins pertinent en raison de l'absence de retour haptique. Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle méthodologie de formation basée sur une immersion visuelle, une plateforme robotique pour une interaction haptique avec un suivi de mouvement. Cette méthodologie est évaluée pour un sujet particulier : la banche, un outil métier fortement sensible. Nous pensons que cette approche permettrait de mieux engager les compagnons lors des formations sur la banche, d'assurer leur sécurité et la prise de conscience en matière de risques TMS. L'objectif à travers cette méthode, est de permettre au compagnon de comprendre les risques liés à son métier et de le former à éviter les risques, et au formateur de bénéficier d'un outil de suivi et d'accompagnement des compagnons. Afin de valider notre méthodologie, nous avons mené des expérimentations auprès de deux profils de personnes : des novices et des professionnels. Cette expérimentation montre une acceptation de la solution par les compagnons.

Title : *Virtual Compagnon*, a Virtual Reality Platform: Evaluation of a haptic solution for manual labour gesture training

Keywords : virtual reality, force feedback, posture analysis, training, MSD, construction

Abstract : Construction is one of the sectors most at risk in terms of health and safety. The social security system attributes more than 14% of the accidents recorded in 2018 to the construction sector. In addition to safety risks, construction workers are exposed to occupational diseases. Musculoskeletal disorders (MSD) are at the top of the list of the most frequent occupational diseases. In order to address these issues, construction companies have implemented a health and safety policy to protect the lives of their employees. This policy provides, among other things, for an improvement in the organizational aspect of work, the adaptation of work to people and training. Training is carried out according to a classic methodology: theoretical and practical training. The training represents constraints of cost, duration and organization. The content must be adapted to specific profiles, be repeatable and allow the trainers to assess the level of the trainees. For training on the right gestures and

posture to avoid the risk of MSDs, the impact of virtual reality (VR) training is less relevant due to the lack of haptic feedback. In this thesis, we propose a new training methodology based on visual immersion, a robotic platform for haptic interaction with motion tracking. This methodology is evaluated for a particular subject: the formwork panel, a highly sensitive tool. We believe that this approach would allow to better engage the construction workers during training on the formwork, to ensure their safety and awareness of MSD risks. The objective through this method is to enable the construction workers to understand the risks linked to their job and to train them to avoid risks, and to enable the trainer to benefit from a tool for monitoring and supporting the construction workers. In order to validate our methodology, we conducted experiments with two profiles of people: novices and professionals. This experimentation shows an acceptance of the solution by the construction workers.



Table des matières

Introduction	1
1 Formation dans la construction	7
1.1 Les risques des métiers de la construction	7
1.2 Troubles Musculo-Squelettiques	9
1.3 Le besoin de prévenir des risques dans le secteur de la construction . . .	11
1.3.1 Formation théorique	14
1.3.2 Formation pratique	15
1.3.3 Le numérique : Nouvelle méthode de formation	16
1.3.4 Processus de formation	18
2 Formation et Réalité Virtuelle	25
2.1 Réalité virtuelle : Définition et origines	26
2.2 Immersion et interaction	27
2.2.1 Salles immersives	27
2.2.2 Casque de réalité virtuelle	28
2.2.3 Les casques de réalité virtuelle à trois degrés de liberté	33
2.2.4 Simulateurs haptiques	39
2.3 La réalité virtuelle : Cas d'usage et application	43
2.3.1 Cas d'usage dans l'industrie	43
2.3.2 Cas d'usage dans la construction	49
2.4 La réalité virtuelle chez Bouygues Construction	52
2.4.1 Les salles immersives de Bouygues Construction	52

2.5	La réalité virtuelle pour les ingénieurs du BIM	59
2.6	La réalité virtuelle pour la sensibilisation aux risques sur chantier	61
2.6.1	La chasse aux risques	61
2.6.2	Le travail en hauteur	62
2.6.3	La consommation d'alcool et de drogues	63
2.6.4	Risque électriques	64
2.6.5	La circulation sur chantier	64
3	La réalité virtuelle dans la prévention des risques dans la construction	
	– Cas d'usage de la banche	71
3.1	Présentation de la banche	72
3.2	Étapes, procédures et risques liés à l'utilisation de la banche	73
3.2.1	La préparation des panneaux	73
3.2.2	Le décoffrage des panneaux	74
3.2.3	Le ferrailage	75
3.2.4	La mise en place des panneaux – le coffrage	75
3.2.5	Le coulage du béton	76
3.2.6	Le nettoyage des panneaux	77
3.3	Banche et formation	78
3.4	Spécification de la formation au poste de travail de banche en réalité virtuelle	80
3.5	Évaluation d'une application en réalité virtuelle en version visuelle	81
3.5.1	Première application développée en réalité virtuelle	82
3.5.2	Évaluation de l'application développée	83
4	Proposition pour la formation d'un compagnon : la plateforme <i>Virtual Compagnon</i>	89
4.1	Spécifications fonctionnelles de <i>Virtual Compagnon</i>	90
4.2	Spécifications de <i>Virtual Compagnon</i>	93
4.2.1	Conception de la structure et des actions du compagnon	94
4.2.2	Instrumentation de la plateforme	97
4.2.3	Définitions des fonctions d'immersion et des composants virtuels	100
4.2.4	Capture de mouvement	104

5	Évaluation des apports pour un nouvel outil de formation	113
5.1	Le contexte	114
5.2	Expérimentation : Contrôle des connaissances	114
5.2.1	Objectif du questionnaire	115
5.2.2	Procédure d'évaluation	116
5.2.3	Protocole	117
5.3	Résultats du test	118
5.3.1	Analyse des réponses au questionnaire complet	119
5.3.2	Verbatim	126
5.3.3	Conclusions de l'étude	129
5.3.4	Perspectives de l'étude	130
6	Conclusion et perspectives	133
6.1	Conclusion	133
6.2	Perspectives	134
	Publications	137
	Bibliographie	138
A	Questionnaires et documents présentés pendant l'expérimentation	147
A.1	Questionnaires	147
A.1.1	Classement et notation des questions	147
A.1.2	Questionnaire en français	149
A.1.3	Questionnaire en anglais	152
A.2	Textes descriptifs	155
A.2.1	Textes descriptifs en français	155
A.2.2	Textes descriptifs en anglais	156

B	Analyse du questionnaire	157
B.1	Questions principales	157
B.1.1	Groupe Novice	157
B.1.2	Groupe Expert	158
B.1.3	Comparaison des groupes	159
B.1.4	Effets	163
B.1.5	Corrélations entre les scores	166
B.2	Questions secondaires	169
B.2.1	Groupe Novice	169
B.2.2	Groupe Expert	170
B.2.3	Comparaison des groupes	171
B.2.4	Effets	175
B.2.5	Corrélations entre les scores	178
B.3	Résumé	180
B.3.1	Remarques	180
B.3.2	Résultats	181
B.4	Statistiques descriptives	182
B.4.1	Totalité des questions	182
B.4.2	Questions principales	187
B.4.3	Questions secondaires	191

Table des figures

1.1	Exemples d'innovations développées pour Bouygues Construction	13
1.2	Casques de réalité virtuelle présents sur le marché	17
1.3	Principe de formation	18
1.4	Formation théorique	19
1.5	Formation pratique	20
1.6	Formation numérique	20
1.7	Outils de formation numérique	21
1.8	Le cône d'apprentissage d'Edgar Dale	21
1.9	Méthodologie pour la formation	22
1.10	Méthodologie pour la formation dans la construction	23
2.1	Salles immersives pour le bâtiment	27
2.2	Le simulateur Sensorama	29
2.3	The ultimate display d'Ivan Sutherland	29
2.4	Le Super Cockpit développé par l'ingénieur Thomas Furness	30
2.5	Le VIEW – Casque de RV développé par la NASA	30
2.6	Le Sega VR – Casque de RV dédié au grand public développé par Sega .	31
2.7	Le Virtual Boy – Casque de RV dédié au grand public développé par Nintendo	31
2.8	Différence entre trois DdL et six DdL	33
2.9	La première version de l'Oculus Rift	34
2.10	Les casques de réalité virtuelle à trois degrés de liberté	34
2.11	Le casque de RV HTC Vive avec ses manettes et ses « Lighthouse » . . .	35

2.12	Les casques de RV utilisés dans la salle Arcas	36
2.13	Les gants Data Glove de la société VPL	37
2.14	Le Nintendo Power Glove	37
2.15	Le tapis roulant Omni par Virtuix	37
2.16	Le Vive Tracker	38
2.17	Capture de mouvement d'une danseuse grâce au Vive Tracker et anima- tion d'un avatar en EV	38
2.18	Le simulateur de neurochirurgie alliant RV et retour de force	40
2.19	Le simulateur Virtual Fauteuil	41
2.20	Modèle pour <i>Virtual Fauteuil</i>	41
2.21	Modèle pour <i>Virtual Fauteuil</i> – Grand public	41
2.22	Modèle pour <i>Virtual Fauteuil</i> – Architectes	42
2.23	Modèle pour <i>Virtual Fauteuil</i> – PMR	42
2.24	Modèle pour <i>Virtual Fauteuil</i> – Ergothérapeute	43
2.25	Prototypage virtuel	44
2.26	Formation à l'assemblage dans le secteur automobile	44
2.27	Utilisation de la RV chez Renault	45
2.28	Évaluation de l'ergonomie d'un véhicule	45
2.29	Outil de personnalisation de véhicule	45
2.30	Formation à la maintenance en aéronautique	46
2.31	Le simulateur <i>Link Trainer</i> d'Edwin Link	47
2.32	Formation des militaires	47
2.33	Formation au tir – Classique/RV	48
2.34	Formation des chirurgiens – Classique/RV	49
2.35	Modification bijective entre les outils métiers et la RV	50
2.36	Exemples de formations en RV sur les outils de chantier	51
2.37	Prévention des risques liés au travail en hauteur en RV	51
2.38	L'écran hémisphérique de la salle Callisto	54
2.39	Le Cave de la salle Arcas	56

2.40	Le mur d'écran	56
2.41	Les casques de réalité virtuelle utilisés dans la salle Arcas	57
2.42	Aménagement de la deuxième version de la salle Arcas	58
2.43	La réalité virtuelle pour la visite d'appartement	60
2.44	Application de travail en hauteur développée par Bouygues Construction	62
2.45	Application « drogues et alcool » développée par Bouygues Construction	63
2.46	Les modalités d'interaction en fonction des profils et des objectifs dans la construction	65
2.47	Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil commercial	65
2.48	Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil ingénieur BIM	66
2.49	Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil Client . . .	66
2.50	Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil Formateur	67
2.51	Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil Ergonome	67
2.52	Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil Compagnon	68
3.1	Banche B07	72
3.2	Décoffrage et désaccouplement des panneaux	74
3.3	Ferraillage	75
3.4	Mise en place des abouts et des tiges	76
3.5	Phase de bétonnage	77
3.6	Mise en œuvre de la banche	79
3.7	Fermeture du voile de banche	79
3.8	Stabilisation de la banche	81
3.9	Instance du modèle de formation du compagnon pour l'application de réalité virtuelle visuelle	81
3.10	Le support théorique pour l'application en RV de stabilisation de la banche	82
3.11	Chantier virtuel extrait d'une maquette BIM	83
3.12	Flèches indiquants la tâche à accomplir	83
3.13	Principe de l'application RV de stabilisation de la banche	84

3.14	Méthodologie pour la formation sur la stabilisation de la banche en réalité virtuelle – Compagnon	84
3.15	Méthodologie pour la formation sur la stabilisation de la banche en réalité virtuelle – Formateur	84
3.16	Méthodologie pour la formation sur la stabilisation de la banche en réalité virtuelle – Ergonome	85
4.1	Banche B07 de 120 cm × 285 cm	90
4.2	La barre à mine et les emplacements sur la banche	91
4.3	Fermeture de la banche à la barre à mine	94
4.4	La force appliquée par la pointe	96
4.5	La plateforme robotique de <i>Virtual Compagnon</i>	96
4.6	Capteur de présence barre	97
4.7	Schéma de fonctionnement simplifié	98
4.8	Architecture de contrôle	100
4.9	Représentation 3D d’un chantier extrait d’une maquette BIM	101
4.10	Modélisation d’une ville autour du chantier	101
4.11	Modèles 3D utilisés dans l’application RV de <i>Virtual Compagnon</i>	102
4.12	Vive Tracker	102
4.13	Emplacements des Vive Tracker pour le positionnement de la banche virtuelle	103
4.14	Suivi de la barre à mine à l’aide des Vive Tracker	103
4.15	Gants de réalité virtuelle Noitom Hi5	104
4.16	Instance du modèle de <i>Virtual Compagnon</i> – Ergonome	104
4.17	Composantes du système VICON	105
4.18	La solution matérielle développée par TEA	106
4.19	Solution logicielle développée par TEA	106
4.20	Placement des capteurs de suivi de mouvement	108
4.21	Suivi du mouvement grâce au VICON	108
4.22	Représentation des trajectoires enregistrées par le VICON	109

4.23	Centre de gravité des trajectoires des marqueurs	109
4.24	Représentation du squelette des membres supérieurs à partir des centres de gravité des trajectoires des marqueurs	110
4.25	Analyse visuelle proposée par le logiciel Captiv à partir des données en- registrées sur le T-Log	110
4.26	Analyse descriptive de la session dans le logiciel Captiv	111
5.1	Procédure suivie pour l'expérimentation – Protocole Bouygues Construction	116
5.2	Un participant en cours de test sur la plateforme au sein du laboratoire .	117
5.3	Un compagnon en cours de test sur la plateforme au CFA	118
5.4	Interaction <i>Groupe</i> \times <i>Temps</i>	120
5.5	Tracé des résidus normalisés de Student	121
A-1	Schéma explicatif des boutons de la manette du HTC Vive	155
A-2	Explanatory diagram of the buttons on the HTC Vive controller	156

Liste des tableaux

3.1	Retour d'experts sur l'application RV	85
4.1	Limites des forces de poussée et de traction verticales	95
5.1	Caractéristiques des participants du groupe des novices	117
5.2	Caractéristiques des participants du groupe des professionnels	118
5.3	Moyenne et écart-type du groupe des novices	119
5.4	Moyenne et écart-type du groupe des professionnels	119
5.5	Test de type III des effets fixes	120
5.6	Test de Friedman pour le groupe des novices	121
5.7	p-values des tests post-hoc de Nemenyi	121
5.8	Test de type III des effets fixes	122
5.9	Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	122
5.10	p-values trouvées par le test de Friedman	122
5.11	Moyenne et écart-type des gains Q_n-Q_{n-1} du groupe des novices	123
5.12	Moyenne et écart-type des gains Q_n-Q_{n-1} du groupe des professionnels	123
5.13	Test de type III des effets fixes	123
5.14	Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	124
5.15	Analyse des différences entre les modalités	124
5.16	Test de Friedman pour le groupe des novices	125
5.17	p-values calculées par les tests post-hoc de Nemenyi	125
5.18	Test de Friedman pour le groupe des professionnels	125

5.19 Synthèse des retours des novices sur l'expérimentation	126
5.20 Synthèse des retours des professionnels sur l'expérimentation	127
5.21 Tableau récapitulatif des moyennes et écart-types de chaque groupe pour chaque session	128
A-1 Répartition des questions du questionnaire	148

Remerciements

Il y a tant de personnes à remercier à l'aboutissement d'une thèse. Quel que soit le sentiment de solitude ressenti à certains moments, ce projet de thèse aurait pu échouer maintes fois et il convient de remercier tous ceux qui, par leur soutien, ont permis sa réalisation.

Je tiens à remercier tout particulièrement les membres du jury de thèse pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de mon manuscrit et pour leurs différentes remarques.

Je remercie M. Eric Monacelli, mon directeur de thèse, pour son aide, son écoute et son encadrement tout au long de cette aventure. Je le remercie de m'avoir offert l'opportunité de cette thèse, de m'avoir encouragé et apporté son soutien tout au long de cette thèse et surtout lors des moments les plus difficiles.

Je remercie Mme Laure Ducoulombier, ma responsable scientifique et M. Thiébault Clément, mon directeur R&D chez Bouygues Construction, de m'avoir accompagné et guidé, et de m'avoir fait confiance. Cela a été une chance de faire partie de leur équipe et ils ont su m'apporter un cadre de travail idéal à l'avancement de mon travail de thèse d'une part, et au développement de ma carrière professionnelle de l'autre. Je les remercie infiniment de m'avoir offert cette chance.

Je tiens à remercier toutes les personnes chez Bouygues Construction et au LISV, qui ont contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. C'est toujours agréable de travailler dans la bonne humeur et d'autant plus appréciables d'avoir des moments d'échange et de rire en dehors du travail.

Je ne remercierai jamais assez ma famille et mes amis qui m'a apporté un soutien sans faille. Même celles et ceux qui ne sont plus ici ont activement participé. Rien ne me fait plus plaisir que de vous savoir fiers de moi.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement M. Benjamin Nguyen et M. Hugo Martin, qui m'ont apporté tant de choses sur les plans personnel et professionnel. C'est grâce à eux qu'aujourd'hui, j'ai eu la chance de commencer cette thèse et d'être fier de son aboutissement. Merci pour votre bienveillance et surtout merci pour votre amitié.

Introduction

Le secteur de la construction est un secteur ayant une grande importance économique avec plus de 140 milliards d’euros de travaux en 2019 [Fédération française du bâtiment, 2020]. Le secteur du Bâtiment et Travaux Publics (BTP) répond aux enjeux majeurs comme le besoin en logements et la croissance démographique. Le secteur a donc un besoin constant d’une main d’œuvre qualifiée pour répondre à ces enjeux.

Cela dit, la construction reste une industrie dont les métiers représentent un risque sur la santé et la sécurité des salariés. En effet, en 2018, d’après les chiffres de la Caisse Nationale de l’Assurance Maladie (CNAM), le secteur du BTP représente 14% de l’ensemble des accidents de travail recensés dans les différentes industries, 16% des accidents ayant conduit à une incapacité permanente et 19% à des décès [CNAM, 2020]. Ces accidents ont cumulé un peu plus de six millions de journées de travail perdues pour le secteur. La même année, en matière de maladies professionnelles, le BTP représente 15,3% des statistiques recueillis par la CNAM tout secteur confondu, 16% ont conduit à une incapacité permanente et 19% à des décès suite à une maladie professionnelle. Les maladies professionnelles ont ainsi cumulé 1,6 million de journées de travail perdues [CNAM, 2020].

Tout accident peut potentiellement avoir une conséquence. Il existe deux familles de risques auxquels sont exposés les salariés : Les risques immédiats et les risques différés.

Les risques à effet immédiat sont des risques dont les dommages sont visibles sans exposition sur un temps minimum. Lors du travail en hauteur, le risque de chute est présent, et en cas d’accident, les conséquences seront immédiates.

Au contraire, les risques différés provoquent des dommages dont les effets sont visibles sur le long terme. Dans la construction, l’un des risques différés le plus présent est le développement des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS). Les facteurs biomécaniques contribuent fortement à la survenue des TMS. En effet, la manutention manuelle est la première cause d’apparition de ces troubles. Elle a été responsable de 48% des TMS en 2018 [CNAM, 2020].

Pour prévenir des accidents et limiter les risques, les entreprises mettent en place une politique prévention qui s'appuie sur les neuf grands principes généraux [INRS, 2014].

Ces neuf principes sont :

- Éviter les risques en supprimant le danger,
- Évaluer les risques pour prioriser les actions de prévention,
- Combattre les risques à la source en intégrant le plus tôt possible la prévention dès la conception des outils ou du poste du travail,
- Adapter le travail à l'homme en prenant en compte les différences entre les individus,
- Adapter la prévention aux évolutions de la technique,
- Remplacer ce qui est dangereux par ce qui l'est moins,
- Planifier la prévention en prenant en compte tous les paramètres sociaux, environnementaux et organisationnels,
- Prioriser les mesures de protection collectives,
- Former et informer les salariés des risques et des mesures de prévention.

La formation est un processus d'acquisition de connaissances et de savoir-faires spécifiques dont une personne a besoin pour exercer un métier. En plus de l'acquisition de compétences, elle sert à sensibiliser les salariés aux risques liés à leurs activités, à les former et les entraîner aux bonnes pratiques à adopter afin d'éviter les accidents.

Dans la construction, les ouvriers qualifiés du bâtiment, appelés « compagnons » sont formés en centre de formation ou sur chantier. Ils sont formés à l'utilisation des outils et aux procédures propres à l'entreprise d'une part, et sensibilisés aux risques liés à la santé et à la sécurité de leurs métiers. Il existe deux formats de formation : un atelier théorique et un atelier pratique.

La session théorique se déroule généralement dans une salle. Le formateur présente ainsi l'ensemble des procédures, des règles et des mesures de prévention mises en place par l'entreprise, en abordant l'aspect théorique de celles-ci.

La session pratique se déroule sur le terrain. Les compagnons se retrouvent ainsi devant les différents outils et mettent en pratique les connaissances acquises lors de la session théorique.

De nos jours, les ordinateurs, les smartphones et les tablettes font partie du quotidien. Cela a facilité l'émergence d'une nouvelle forme d'apprentissage et de formation, les contenus numériques. Depuis quelques années, il existe de plus en plus de cours en ligne et de supports de formation ludiques alliant amusement et pédagogie. Ces outils répondent à un besoin de réduction du coût mais également de répétabilité et d'accès

permanent à l'information. Cela dit, ils sont difficilement applicables dans certaines situations comme la formation aux procédures métiers, car ils ne permettent pas une mise en situation réaliste notamment celles qui sont autour des actions gestuelles et la manutention manuelle de charge. Sur ce point, la réalité virtuelle se démarque et plusieurs contenus se sont vus adaptés à cette technologie.

La réalité virtuelle (RV) est un domaine de recherche qui désigne les systèmes permettant de reproduire un environnement grâce à un ordinateur. Elle permet ainsi à l'utilisateur d'être immergé dans une reproduction en trois dimensions (3D) et de stimuler ses différents sens comme la vue ou l'ouïe le plus souvent, mais aussi l'odorat et le toucher. Aujourd'hui, le secteur de la construction utilise la RV pour immerger l'utilisateur dans des chantiers virtuels.

Cette thèse s'intéresse aux apports de la réalité virtuelle sur les problématiques de la formation santé et sécurité. Ce sujet de recherche a pour but de proposer une méthodologie de formation, impliquant la réalité virtuelle pour la sensibilisation et la formation à la santé et à la sécurité. Nous allons tenter de répondre à quelques questions :

- Quels sont les profils auxquels la formation s'adresse ?
- Quels sont les besoins spécifiques à ces profils ?
- Quels modes d'interaction conviennent le mieux à ces profils et à ces besoins ?

Au travers de cette étude, plusieurs domaines seront abordés afin d'accompagner la réalisation du projet de thèse. Dans un premier temps, nous étudierons les enjeux liés à la santé et à la sécurité dans le secteur de la construction. Dans un deuxième temps, nous verrons les formations classiques puis les formations s'appuyant sur la réalité virtuelle en identifiant les apports spécifiques à cette nouvelle technologie. Enfin, nous détaillerons le développement d'un système de formation mêlant réalité virtuelle, plateforme robotique et dispositif de suivi de mouvement.

Contexte

Ce manuscrit est le résultat d'une thèse CIFRE, partenariat entre le Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV) de l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines – Campus Paris Saclay et Bouygues Construction. Au cours de cette thèse, j'ai été à la fois encadré par des chercheurs universitaires et des ingénieurs d'études opérationnels.

Cette thèse a pour origine le besoin de définir de nouveaux outils de formation en matière de santé et de sécurité exprimé par l'entreprise. La formation restant un coût

important pour les entreprises de construction qui veillent à la sécurité des compagnons, j'ai identifié avec mes encadrants une approche pertinente pour accompagner les sujets de formation. Ce contexte, en collaboration avec une entreprise, m'a mis au contact direct des compagnons, qui sont les plus exposés aux risques de ce métier. Ce document décrit mes travaux, réalisés en étroite collaboration avec le LISV et les départements de Bouygues Construction.

Problématique

Le secteur de la construction est classé parmi les secteurs les plus à risques pour ses salariés. La forte croissance démographique engendre un besoin de construire plus et vite. La multiplication des chantiers, les environnements de travail de plus en plus restreints ainsi que des délais de livraison de plus en plus courts, sont d'autant plus de facteurs de risques sur la santé et la sécurité des compagnons de chantier. Pour répondre à ces problématiques de santé et de sécurité, les entreprises de construction ont recours à la formation. Néanmoins, ces formations restent coûteuses pour ces entreprises et difficiles à mettre en place. Au-delà de l'objectif d'acquérir des connaissances techniques, les formations servent également à monter en compétences les compagnons sur les sujets de sécurité et de santé en les sensibilisant aux risques liés à leurs métiers. Les formations autour de la banche, par exemple, qui est un outil de coffrage très fréquemment utilisé sur les chantiers nécessitent une intervention en extérieur ainsi que la mobilisation d'une grue. La formation se faisant en présentiel sur les sites de formations, cela engendre également des frais de déplacement, de logement et de mobilisation des compagnons. De plus, les outils utilisés lors de ces formations ne permettent pas d'évaluer les risques sur la santé. Ainsi, aucune donnée n'est récoltée sur la posture lors de la manipulation de la banche.

De nouveaux outils de formation ont vu le jour et la réalité virtuelle en fait partie. La réalité virtuelle est un domaine scientifique permettant de reproduire en 3D des environnements réels ou imaginaires. Dans la construction, elle permet de reproduire des chantiers de construction. Elle est de plus en plus utilisée dans la formation de par le faible coût du matériel et des développements logiciels et la non mise en danger de l'utilisateur, comparé à des formations classiques.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons exploré le potentiel de la réalité virtuelle dans la formation et la sensibilisation aux risques sur la santé et la sécurité des métiers du secteur de la construction. Nous nous sommes particulièrement penchés sur la question des troubles musculo-squelettiques, risque majeur dans le secteur. Pour cela, nous avons développé une application de réalité virtuelle reprenant la mise en œuvre de la banche

grâce à la barre à mine. Nous avons réalisé une plateforme robotique qui, associée à l'application de réalité virtuelle, permet de rajouter une immersion haptique, en plus de l'immersion visuelle, grâce au retour de force. Cette plateforme permet grâce à différents capteurs d'avoir un retour quantitatif et visuel facilitant l'évaluation de la posture d'une part, et la sensibilisation des compagnons aux bonnes pratiques de l'autre.

Plan de thèse

Dans le chapitre 1, nous présenterons les risques liés aux métiers de la construction. Nous nous attarderons sur les troubles musculo-squelettiques en section 1.2, qui représentent les maladies professionnelles les plus présentes dans le secteur de la construction et chez les compagnons. Dans la section 1.3, nous mettrons en avant la formation qui est un des piliers de la prévention des risques. Nous détaillerons le processus dit « classique » ; la session théorique et la session pratique, et nous présenterons les nouveaux modes de formation dites « numériques ».

L'un des outils de formation utilisé dans la formation est la réalité virtuelle (RV). Nous définirons la RV dans le chapitre 2. Nous présenterons les différents outils permettant de vivre des expériences en RV comme les salles immersives présentées dans la section 2.2.1 et les casques de RV présentés dans la section 2.2.2. Nous nous intéresserons également aux simulateurs haptiques dans la section 2.2.4, qui rajoutent l'immersion haptique à une expérience virtuelle. Nous finirons par les cas d'usage dans différents secteurs et notamment dans la construction dans la section 2.3, et décrirons les premiers cas d'usage développés chez Bouygues Construction.

Dans le chapitre 3, nous nous intéresserons à la formation en RV d'un outil indispensable dans la construction, la banche. Nous présenterons la banche dans la section 3.1 et listerons les différents risques liés à son mode opératoire. Dans la section 3.4, nous décrirons la première application de RV dédiée à la formation à la stabilisation de la banche, une des étapes du mode opératoire de mise en œuvre.

La construction de cette thèse porte sur la proposition d'inclure une interaction haptique dans la formation aux gestes des compagnons. Pour montrer l'apport de cette modalité, nous avons développé une plateforme adaptée aux gestes de manipulation autour d'une banche avec une analyse de mouvement. Le chapitre 4 présente le projet *Virtual Compagnon* développé dans le cadre de cette thèse. Nous présenterons les spécifications fonctionnelle dans la section 4.1 et détaillerons le développement mécanique, électronique et informatique de la plateforme dans la section 4.2.

Enfin, nous avons proposé une évaluation de l'acceptation pour deux groupes : des

novices et des professionnels en formation. nous analyserons les expérimentations menées, reporterons les résultats et les analyses et commenterons l'étude dans le chapitre 5.

Chapitre 1

Formation dans la construction

Sommaire

1.1	Les risques des métiers de la construction	7
1.2	Troubles Musculo–Squelettiques	9
1.3	Le besoin de prévenir des risques dans le secteur de la construction	11
1.3.1	Formation théorique	14
1.3.2	Formation pratique	15
1.3.3	Le numérique : Nouvelle méthode de formation	16
1.3.4	Processus de formation	18

Le secteur du bâtiment et des travaux publics est l'un des secteurs d'activité les plus à risque. Mais le secteur du BTP est également en évolution constante en matière de santé et de sécurité. Cela passe par l'amélioration de la conception des chantiers, l'innovation en matière de matériel conforme et répondant aux normes de sécurité et une gestion améliorée des interactions entre les intervenants.

Dans ce chapitre, nous synthétiserons les différents risques liés aux métiers de la construction. Nous aborderons le sujet des troubles musculo–squelettiques. Nous parlerons ensuite des formations professionnelles pour la prévention des risques.

1.1 Les risques des métiers de la construction

Un accident du travail peut être défini comme un événement entraînant des dommages physiques ou mentaux [European Commission (EC), 2012]. Ce terme englobe tous les accidents survenus lors de l'exercice de l'activité professionnelle comme les empoisonnements, les actes délibérés d'autres personnes ou les accidents de circulation au

cours du travail [European Commission (EC), 2012]. Un rapport de la Commission Européenne (rapportant les statistiques de l'évolution de la typologie d'accidents, de leurs nombres et de leurs causes entre 1999 et 2007) classe ainsi les secteurs de l'agriculture, de l'artisanat et de la construction comme des secteurs dans lesquels les accidents du travail sont les plus fréquents [European Commission(EC), 2010]. Un rapport plus récent de l'exécutif britannique de la santé et la sécurité (British Health and Safety Executive – HSE) pointe ces mêmes secteurs comme des secteurs à risques au niveau accidentologie [Health and Safety Executive, 2017a]. Le rapport SUMER (Surveillance médicale des expositions des salariés aux risques professionnels) de 2017, paru en 2019, fait état des différents risques liés aux secteurs de l'agriculture, la construction, l'industrie et le tertiaire [Memmi *et al.*, 2019].

Parmi les industries représentant le plus de risques, le secteur de la construction figure à la première place avec 30% des accidents en 2017 [Health and Safety Executive, 2017a]. C'est le secteur qui connaît le plus fréquemment des accidents mortels [Pinto *et al.*, 2011]. En 2010, la construction compte 43,3 accidents par million d'heures travaillées, un chiffre supérieur à la moyenne [Officiel Prevention, 2011; E-Santé, 2014]. L'institut national de recherche et de sécurité (INRS) recense 18% des accidents avec arrêt de travail et 30% de décès pour une population représentant 9% des salariés du régime général [INRS, 2017]. Ceci peut s'expliquer par le nombre de chantiers, les interactions diverses entre les différents intervenants (sous-traitants, engins . . .), la diversité et la complexité des interventions, les cadences élevées, et les conditions quotidiennes de travail des employés du Bâtiment et Travaux Publics (BTP) qui sont confrontés à des risques en matière de sécurité [Pinto *et al.*, 2011]. Ces risques sont divisés en plusieurs catégories ou « familles de risques ».

Il existe par exemple les risques liés aux déplacements sur chantier. En effet, un chantier est un environnement dynamique. Les cadences y sont élevées et les espaces, parfois restreints, comme dans les chantiers de réhabilitation ou en coeur de ville. La forte interaction qui existe entre les employés eux même d'une part, et les employés et les engins de chantier de l'autre, peut être une source d'accidents.

Le travail en hauteur représente également un risque. Le déplacement sur les échafaudages ou l'utilisation de matériel mal entretenu, peuvent générer des accidents.

Lors de ces interventions, l'exposition à des facteurs extérieurs est également une source de risque sur la santé des compagnons. Ils sont ainsi exposés aux rayons ultraviolets ou au froid, augmentant ainsi les risques de développer le cancer de la peau ou une hypothermie.

L'exposition aux poussières et au bruit vient s'ajouter à cette liste et représente

également un risque. Elle est peut être la cause de problèmes respiratoires et d'une diminution ou d'une perte de l'ouïe [International Labour Office, 2015].

Les accidents du travail ont augmenté de 1,9% en 2019 par rapport à 2018. Parmi les deux causes principales de ces accidents, on trouve la manutention manuelle des charges [Castell, 2019]. La manutention manuelle correspond aux activités faisant appel à la force humaine [OPPBT, 2016a]. Le Ministère du Travail définit ces activités comme toute opération de levage, de poussée, de traction, de port ou de déplacement exigeant un effort physique [Ministère du Travail, 2008b]. Elle est considérée par l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBT), comme l'un des facteurs de pénibilité au travail [OPPBT, 2016b]. En effet, bien que mécanisées, certaines tâches restent à risque. Certaines situations nécessitent des postures de travail contraignantes ou la manutention de charges lourdes difficile à manipuler. L'utilisation d'outillage portatif, en plus de vibrations transmises aux bras et aux mains, vient aggraver l'exposition aux risques de lésions articulaires ou de la colonne vertébrale, de lombalgies ou encore des douleurs à différentes parties du corps (épaules, poignets. . .) [Officiel Prevention, 2011]. Les manutentions manuelles sont également associées à des gestes répétitifs. En effet, certaines tâches exigent une répétition des gestes à fréquences élevées. L'OPPBT décrit un geste répété comme étant un geste réalisé avec ou sans outils et qui mobiliserait une ou plusieurs articulations associées au même geste [OPPBT, 2016c]. Parmi ces gestes, l'OPPBT liste la pose de matériaux, l'application de produits, l'action du poignet ou du bras en utilisant de l'outillage ou encore le terrassement manuel [OPPBT, 2016c]. Ces actions peuvent également mettre en jeu une posture inadéquate, comme lors du travail en extension ou les bras levés, le transport de charges ou les mouvements de rotation [OPPBT, 2016c]. Le risque associé à ces répétitions des gestes peut être aggravé par l'état des outils, l'absence de marge de manœuvre, le rythme du travail, la durée des tâches ou encore les vibrations et les chocs. Ces actions sont donc assez courantes. Cela présente un risque sur les articulations comme celles de la main, du coude, du genou et surtout les épaules [OPPBT, 2016c]. Ce risque, à long terme, et lié à l'activité professionnelle occasionne des troubles sur les muscles et les tendons. Associés au risque sur les articulations, cela représente un des facteurs de risque d'apparition des troubles musculo–squelettiques [OPPBT, 2016c; OPPBT, 2016d].

1.2 Troubles Musculo–Squelettiques

Les Troubles Musculo–Squelettiques (TMS) est un terme désignant les anomalies touchant le membres inférieurs et supérieurs ainsi que la colonne vertébrale du corps

humain. Ils sont généralement liés à des activités physiques exerçant un stress sur l'ensemble du système musculo-squelettique et sont considérés comme la première cause d'invalidité [Punnett et Wegman, 2004]. Dans son traité de 1777, Ramazzini décrit les TMS comme découlant de trois causes : être constamment assis, un mouvement répétitif du bras de manière identique et l'implication de l'esprit [Ramazzini, 1777]. Ces troubles affectent les tissus servant au maintien des articulations. Ils apparaissent essentiellement au niveau des épaules, le dos, les poignets ou encore les genoux et les chevilles et se manifestent par des tendinite ou des sciatiques. Ils sont dus principalement à une sollicitation répétée des articulations lors d'une activité professionnelle [OPPBTP, 2016d]. Ces troubles se manifestent par des douleurs fonctionnelles et peuvent, à un stade avancé générer des conséquences plus graves pouvant empêcher la pérennité de l'emploi, comme des inaptitudes ou des incapacités temporaires ou permanentes au travail. Le secteur de la construction est très concerné par ces troubles. En effet, comme expliqué en 1.1, le secteur du BTP est un secteur à risques de par la complexité des tâches, les contraintes liées au planning, et aux conditions de travail complexes. De plus, l'OPPBTP recense que neuf maladies professionnelles sur dix sont dues aux TMS [OPPBTP, 2016d]. Cela dit, le diagnostic est généralement tardif. En effet, le BTP est un secteur très masculin, et les salariés sont habitués à la dureté de la tâche, se plaignent rarement et ignorent les signaux alarmants et les douleurs, les associant aux « risques du métier » [OPPBTP, 2016d].

L'étude de l'organisme précise également qu'il existe différents facteurs de TMS qui sont : organisationnels, individuels, aggravants et biomécaniques.

D'un point de vue organisationnel, certaines situations sur chantier peuvent s'avérer compliquées. Les compagnons sont parfois confrontés à un stock de matériel inadapté ou des zones de stockage éloignées. Les délais d'exécutions tendus et l'absence ou la défaillance de matériel d'assistance à la manutention sont également source d'apparition de TMS. Les vibrations transmises par les outillages comme les perceuses ou les marteaux-piqueurs ou par la conduite d'engins de chantier augmentent ce risque. Enfin, les conditions physiques, l'âge et le temps passé sur des postes difficiles renforcent l'impact de ces risques. Sur chantier, le corps du compagnon est parfois mis à rude épreuve. Il se retrouve ainsi dans des postures de travail contraignantes comme les bras levés en extension, agenouillé ou encore le dos courbé. Il est aussi possible qu'il se retrouve dans des situations de mouvement de préhension d'objets ou à forcer lors de phase de serrage. De plus, ces actions peuvent se répéter. Cette répétition de ces mouvements engendre une augmentation du risque d'apparition de TMS [OPPBTP, 2016d].

Pour éviter ces risques, l'OPPBTP préconise un certain nombre d'actions [OPPBTP, 2016d]. En effet, ces préconisations sont adressées aux compagnons et aux entreprises.

Pour les compagnons, un certain nombre de conseils existe. Il est ainsi conseillé de ne pas s'accroupir ou se relever rapidement, en s'appuyant sur les bras pour ne pas laisser les genoux supporter tout le poids du corps. Il est également conseillé de faire en sorte que les bras soit à la hauteur des épaules lors du travail en hauteur. En ce qui concerne le port de charges, il est préconisé d'être deux pour les charges lourdes et d'adapter sa posture lors du port et du déplacement de la charge, lorsqu'il n'est pas possible de mécaniser ou de réduire le poids à la source [OPPBTB, 2016d].

En ce qui concerne les entreprises, l'organisme suggère un plan d'action approprié. Ainsi, il est recommandé d'opter pour un équipement réduisant les vibrations et d'investir dans du matériel récent. Des aides financières pour financer le matériel ou promouvoir la prévention des TMS sont également proposées. Il est aussi important de vérifier l'état du matériel utilisé et de bien l'entretenir. L'utilisation de protections individuelles peut également atténuer les risques en protégeant les opérateurs contre le froid ou les chocs. Enfin, l'OPPBTB conseille d'informer les compagnons des risques encourus. En effet, les entreprises sont tenues de former leurs compagnons [Ministère du Travail, 2008a]. Une formation aux gestes et aux postures est donc obligatoire afin d'informer les compagnons des risques liés à leurs métiers et ainsi prévenir de l'apparition de maladies professionnelles et notamment les TMS.

1.3 Le besoin de prévenir des risques dans le secteur de la construction

La formation en milieu professionnel est le processus permettant l'acquisition du savoir ou d'un savoir-faire nécessaire à l'activité professionnelle. Nous pouvons également la définir comme l'ensemble des outils facilitant l'apprentissage des comportements, des aptitudes permettant l'intégration dans l'entreprise. Dans tous les secteurs d'activité, elle est un passage obligé pour tous les collaborateurs. Pour le compagnon, c'est un moyen d'apprendre ou d'approfondir ses connaissances d'un métier. Pour l'employeur, elle permet de former et d'informer ses compagnons des procédures et règles internes, d'améliorer la productivité, de garantir un niveau d'expertise et de préserver la santé et la sécurité de ses salariés.

Au-delà du développement des compétences des employés, et depuis l'évolution de la législation concernant les formations professionnelles du code du travail [Ministère du Travail, 2019], les entreprises ont mis en place des formations en prévention santé et sécurité.

Ces formations permettent donc de former les compagnons sur les précautions à

prendre pour assurer leur sécurité et celles de leurs collègues, les mesures de prévention à respecter dans l'entreprise et le comportement à adopter en cas d'accident. L'objectif est que les compagnons soient conscients et qu'ils puissent maîtriser les risques spécifiques à leur environnement et à leur poste de travail. Le contenu est dispensé lors de l'arrivée d'un nouveau collaborateur sur un poste de travail à risques ou lors de la création ou la modification d'un poste de travail exposant à des risques nouveaux. Dans le même rapport de la HSE britannique, l'étude évoque aussi les maladies professionnelles ; qui portent atteinte à la santé au cours de l'activité professionnelle ou a posteriori [Health and Safety Executive, 2017b].

Pour ces raisons, en plus des formations sécurité dispensées, les compagnons sont également amenés à suivre des formations portant sur la santé. Ces stages se concentrent sur l'apprentissage de la prévention des risques liés à la santé (risques différés). Ces formations peuvent porter sur l'aspect psycho-social de la santé mais également – c'est ce qui nous intéresse ici – sur les gestes, les postures ou encore les habitudes de travail.

Ces risques sur la santé sont visibles et donc mesurables. Cela dit, il existe d'autres risques invisibles ou pouvant survenir plusieurs années plus tard. Parmi ces risques, les Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) sont les maladies les plus courantes [Valero *et al.*, 2016]. Les TMS sont des troubles qui apparaissent principalement lors de manipulations prolongées et répétées d'objets lourds dans des postures déconseillées.

Le HSE estime que 65% des maladies professionnelles recensées dans le secteur du BTP sont dues aux TMS [Health and Safety Executive, 2017b]. Le rapport SUMER 2017 montre également qu'en 2017, 16,1% des compagnons sont exposés à la répétition d'un même geste ou d'une série de gestes à cadence élevée, un chiffre qui reste élevé malgré une nette diminution entre 2010 et 2017 (plus de 10%). Cette diminution est expliquée par des évolutions techniques, avec des aides mécanisées de plus en plus adaptées aux tâches à réaliser [Memmi *et al.*, 2019].

Au-delà des campagnes de prévention à base d'affiches informatives placées sur les chantiers, de rappels des règles lors de quarts d'heure de sécurité, d'échauffements matinaux, de processus de robotisation et d'industrialisation des chantiers, le secteur mise sur la formation afin de mieux renseigner les compagnons sur les postures et les gestes à adopter lors de l'accomplissement des différentes tâches du quotidien [Ganah et John, 2015].

L'ambition de Bouygues Construction en matière de santé et de sécurité est d'atteindre zéro prise de risque pour zéro accident. Cet objectif ambitieux porté par l'ensemble de l'entreprise est soutenu par une forte politique santé et sécurité.

La feuille de route « sécurité » se décline en cinq points majeurs comportant un

certain nombre d'actions à mettre en œuvre. Parmi ces points figurent, le focus sur les incidents HIPO (High POtential risks), la prise en compte de la sécurité au niveau contractuel pour les parties prenantes, le renforcement de la culture sécurité, la standardisation et la simplification des processus et enfin le point auquel se rattache cette thèse, la réduction des événements dangereux. Ce dernier point s'articule autour de plusieurs actions, dont l'innovation, qu'elle soit au niveau du matériel, au niveau organisationnel ou au niveau de la formation. Cette feuille de route « sécurité » s'accompagne d'un « plan santé » qui lui s'articule autour de quatre axes majeurs qui sont, l'ergonomie et la réduction de la pénibilité, l'équilibre de vie, la surveillance de l'état physiologique et psychologique des collaborateurs et enfin l'organisation du travail.

Concernant l'ergonomie et la réduction de la pénibilité, deux points impliquent la formation et la sensibilisation des décideurs et des acteurs. Chaque entité doit alors se positionner sur les actions mises en œuvre avec un suivi des indicateurs de performance et de résultat sur ces actions.

L'entreprise innove en mettant en place des solutions de mécanisation des maintenances. En effet, plusieurs solutions sont déployées sur le terrain comme les exosquelettes, les transpalettes électriques, la « K-Ryole » [K-Ryole, 2020], un chariot d'assistance électrique permettant de transporter 250 kg de charge sans effort ou encore le Bras Zéro-G, un bras anti-gravité entièrement mécanisé permettant la manipulation d'outillage électrique plus facilement, sans avoir à en supporter le poids.



(a) La K-Ryole



(b) Le bras Zéro-G

FIGURE 1.1: Exemples d'innovations développées pour Bouygues Construction

L'entreprise mise également sur les différentes formations mises en place estimant que la formation des collaborateurs est une étape importante avant de les envoyer sur chantier.

Cette formation s'adresse à un type particulier de population : les compagnons. Elle doit être qualifiante, explicite et compréhensible par tous les compagnons indépendamment de leur niveau d'expertise.

Chez Bouygues Construction, les formations sont dispensées par deux organismes : le Centre de Formation des Apprentis (CFA) Gustave Eiffel (pour la formation des

jeunes générations de compagnons) et le centre MATFORM (pour la formation des compagnons et intérimaires) qui intervient aussi sur certains ateliers pour le CFA. Les deux organismes sont affiliés à la base technique et matérielle de Bouygues Construction.

Les formations sont formalisées par les centres de formations à la demande du client : le chantier. Pour un besoin en main d'œuvre opérationnelle, les centres de formation mettent en place une formation spécifique, qui prend en compte le degré de connaissance de base des stagiaires ciblés.

Cette formation est divisée en deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

1.3.1 Formation théorique

L'objectif de tout industriel est d'avoir des salariés qualifiés. Pour Bouygues Construction, développer des formations est lié à la marque employeur. Il s'agit de donner les moyens à l'ensemble de la chaîne managériale de partager la vision sécurité et innovation du groupe en partageant certaines pratiques et processus propres à l'entreprise. Ceci est fait dans l'objectif d'attirer, fidéliser, repérer et développer des talents. Il est question de réussite des collaborateurs, de les inscrire dans une culture d'entreprise, de partager des façons de faire et de leur proposer des possibilités de progression verticales (management) et transversales (nouvelles compétences).

La formation contribue ainsi à la montée en compétences des salariés. Cette compétence doit également être théorique. En effet, le salarié doit non seulement savoir accomplir une tâche, mais doit comprendre également comment et pourquoi elle doit être accomplie selon tel ou tel processus. L'apprentissage passe donc par une formation théorique. Lors de la formation théorique, les stagiaires sont accompagnés d'un formateur. La session se déroule dans une salle et prend la forme d'un échange. L'objectif de cet échange est de faire réagir les apprenants sur des situations de chantier décrites par le formateur s'appuyant sur un support visuel.

Ce dernier présente également différents cas de figures dans lesquels l'apprenant pourrait se retrouver une fois sur chantier (travail en hauteur, utilisation de matériel électroportatif. . .). Il présente les risques associés, le matériel nécessaire pour certaines des situations (harnais, gants. . .) mais également les habilitations requises pour d'autres (Habilitation électrique, le Certificat d'Aptitude à la Conduite en Sécurité – CACES. . .).

Les compagnons apprennent également à détecter les risques, à agir en cas de problème (établir un périmètre de sécurité, informer leurs supérieurs hiérarchiques. . .) et à s'assurer de la conformité de leur environnement de travail afin d'éviter tout danger.

Lors de cette session, les apprenants sont dans une forme d'apprentissage passif, d'un point de vue activité physique. L'interaction s'arrête à l'échange, et aucune manipulation d'outil n'est programmée.

1.3.2 Formation pratique

En industrie, tout développement d'un nouvel outil, de processus ou méthode est accompagné par une campagne de sensibilisation et de formation. Cette campagne vise à expliquer aux salariés les raisons relatives aux changements de méthodologies, telles que les améliorations ergonomiques, l'adaptation aux normes en vigueur ou encore suivre les changements imposés par le marché.

Chez Bouygues Construction, la formation vise également à associer le compagnon dans cette démarche de changement et d'innovation. Les compagnons se retrouvent dans la boucle de la phase d'étude au déploiement. La formation est la dernière étape avant l'utilisation sur chantier. Elle est donc cruciale car elle instaure le cadre d'utilisation du matériel, avec ses normes, ses règles de sécurité et son utilisation. Cela passe par une verbalisation de ces processus. Or, la réalité terrain est tout autre. Il est ainsi important de pouvoir tester et éprouver ces procédures avant une standardisation sur les chantiers. Il faut donc prévoir des séances de formation terrain afin de mettre en pratique les apports de la formation théorique.

Lors de la session pratique, les apprenants se trouvent dans la base de formation de Bouygues Construction. Lors de cette session, qui peut s'étendre sur plusieurs jours, la formation se déroule à l'extérieur, dans le parc matériel.

La journée commence par un rappel des règles de sécurité suivi par un échauffement musculaire. Ensuite, les stagiaires sont accompagnés d'un formateur qui les aide à appréhender leurs futurs outils.

Lors de cette formation, la vigilance du formateur est hautement recommandée. Il doit s'assurer que la manipulation des différents outils se fait en toute sécurité et doit également vérifier constamment que les stagiaires sont équipés de leurs équipements de protections individuelles (EPI – casque de chantier, protection auditive, gants et chaussures de sécurité) et qu'ils s'entraînent en groupe.

Lors de l'utilisation des outils, le formateur donne également des consignes relatives aux gestes et postures à adopter lorsqu'il s'agit de manipuler des objets lourds. Or, cette analyse reste très subjective et dépend fortement de l'expertise du formateur, ne s'appuyant pas sur des outils de mesures quantitatives.

Les compagnons ont un profil particulier. Ils sont, en général des hommes, d'expériences variées, et qui sont plus dans l'application que dans l'intellectualisation d'une

tâche qu'ils pensent maîtriser. Les experts formateurs que nous avons interviewés nous disent essayer, lors des formations, de combiner la théorie et la pratique pour s'assurer de l'intérêt des stagiaires. Ainsi, certaines notions théoriques sont abordées directement dans les ateliers pratiques.

Ces ateliers peuvent être contraignants à mettre en place, pour des raisons de coûts et de faisabilité.

Pendant les sessions théoriques, le contenu doit être ludique, motivant et engageant car il est dispensé à une population manuelle.

Durant les sessions pratiques, le risque « zéro » n'existe pas. Les stagiaires peuvent se blesser lors de la formation. Du point de vue du formateur, il existe peu d'outils d'évaluation et il doit s'appuyer sur ses propres connaissances.

Ce qui est recherché dans une formation est donc la compréhension et la maîtrise d'un savoir ou d'une expertise. Pour s'assurer de la motivation des stagiaires, de fournir des outils d'évaluation aux formateurs et d'assurer la répétabilité des exercices, d'autres formats de formation ont vu le jour.

1.3.3 Le numérique : Nouvelle méthode de formation

La formation professionnelle contribue à la création d'identité professionnelle. Elle n'a cessé d'évoluer au fil du temps. Avec l'émergence de l'industrie 4.0, la formation dite « classique » ne suffit plus. Il est important de maîtriser les outils technologiques. Ce changement fait que les compétences acquises sont rapidement obsolètes et il faut donc s'adapter aux changements. Ainsi, les formations prennent une part importante au sein des entreprises. Cela leur permet de rester compétitif, surtout face à la mondialisation. Les savoir-faires, la maîtrise et les compétences doivent donc être valorisées et optimisées. C'est le rôle, entre autres, des formations.

La mise sur le marché de nouvelles technologies a ouvert un champs nouveau d'exploration de méthodes d'apprentissage. Le format des formations a été adapté à une génération qui grandit entourée de nouvelles technologies et de nouvelles méthodes de communication et d'interaction. Cette adaptation a pour objectif d'amener l'information et de la rendre accessible sur des supports innovants. Ainsi, les organismes de formation numérisent de plus en plus leurs formations. Ils proposent des formations en cours en ligne ouvert et massif (Massive Open Online Course – MOOCs) ou des contenus numériques plus ludiques sur des supports plus mobiles comme des tablettes ou des smartphones.

Chez Bouygues Construction, un « Serious Game » (SG) de « Chasse aux risques »

sur tablette est proposé. Dans cette application, le compagnon est invité à se balader sur un chantier et à détecter les différents risques qui s’y trouvent.

Cela dit, nos experts nous remontent deux constats. Le premier étant que ces contenus restent moyennement acceptés par une population qui n’est pas technophile, et qui n’a pas l’habitude d’utiliser des outils numériques sans assistance pour une partie d’entre eux. Pour les populations plus jeunes et habituées aux outils numériques, on constate une aisance lors de l’utilisation des outils mais cette population juge le contenu très peu réaliste et pas assez proche de la réalité du terrain.

Le deuxième constat rejoint l’avis des jeunes compagnons. En effet, d’après quelques experts chez Bouygues Construction, la numérisation des outils numériques est un bon moyen de validation des acquis théoriques. Cela dit, ils ne voient pas d’intérêt à numériser la partie pratique qui s’appuie fortement sur le réel. On ne peut donc pas tout numériser dans la formation.

Depuis quelques années, l’une des innovations mise en œuvre est la formation des compagnons dans un environnement de réalité virtuelle (RV) immersive. Cette technologie a suscité l’intérêt du secteur de la construction en raison de l’existence de casques immersifs à affichage tête haute (Head Mounted Display – HMD) (Fig. 1.2).



FIGURE 1.2: Casque de réalité virtuelle sur le marché [Source : www.pale.blue]
De gauche à droite, de bas en haut : HTC Vive Pro, HTC Vive Cosmos, Oculus GO, Oculus Quest, HTC Vive Focus, Valve Index

La RV est utilisée chez Bouygues Construction depuis 2015 pour la revue de maquette numérique et la validation technique des projets [Martin, 2016]. D’après les experts de l’entreprise, la RV est un bon outil numérique qui pourrait venir en complément des formations mises en place. En effet, la RV permet de valider les connaissances théoriques. Les casques immersifs permettent quant à eux de mettre le stagiaire en situation dangereuse dans un environnement contrôlé. Cela peut donc venir appuyer la partie pratique

et mettre l'accent sur les risques abordés en théorie.

1.3.4 Processus de formation

Les procédés et les règlements propres aux entreprises assurent leur bon fonctionnement. Elles doivent donc s'assurer que les salariés, les nouveaux comme les anciens, en soient informés et qu'ils les respectent. Il est également important, pour chaque métier, que les employés soient qualifiés afin d'accomplir les tâches qui leurs sont attribuées. Pour cela, les entreprises ont recours aux formations.

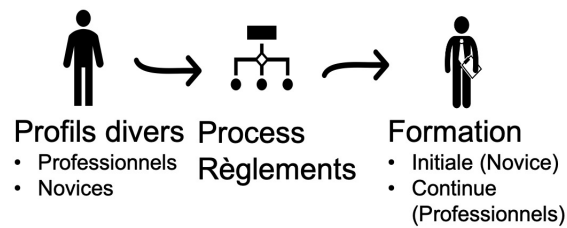


FIGURE 1.3: Principe de formation

La formation est définie par Beach comme une procédure d'acquisition des connaissances et d'améliorations des compétences à but précis [Beach, 1965]. Dans un cadre professionnel, elle a été définie par différents spécialistes du management comme un processus nécessaire au développement de connaissances spécialisées. Ainsi, Yoder la présente comme un acte permettant d'augmenter les connaissances et les compétences d'un employé recruté pour effectuer un travail particulier [Yoder, 1942]. Gowsalya et Asma rapportent ainsi que la formation est la base du développement des ressources humaines [Gowsalya et Asma, 2017]. Ils estiment ainsi que chaque entreprise se doit de former ses employés pour expliquer son système organisationnel parfois complexe. Ce besoin peut être d'autant plus important en cas de changement de mission ou pour faire correspondre les qualifications de l'employé et les exigences du poste, en cas d'évolution ou de changement de matériel [Gowsalya et Asma, 2017].

Kumar et Sharma [Kumar et Sharma, 2001] y répondent en expliquant la différence entre formation et développement. La première se réfère à des instructions techniques et la deuxième se réfère plutôt à des concepts théoriques.

Ces concepts diffèrent sur quatre points : Le contenu, la cible, l'objectif et le quand.

La mise en place d'une formation doit donc répondre à quatre questions :

1. A qui est-elle destinée ?
2. Quel type de formation doit être mise en place ?
3. Dans quel but ?

4. Quand doit-elle avoir lieu ?

Les auteurs détaillent donc que la formation doit être prodiguée à un personnel non-cadre en améliorant ses compétences et aptitudes techniques afin de répondre à un besoin lié à son poste et ses missions, et ce dès son entrée dans l'entreprise [Kumar et Sharma, 2001].

Gowsalya et Asma insistent également sur l'importance des formations. En effet, elle sont destinées aux nouveaux arrivants leur permettant de se familiariser avec le fonctionnement de l'entreprise et sa stratégie ; aux employés actuels pour mettre à jour et améliorer leurs connaissances [Gowsalya et Asma, 2017].

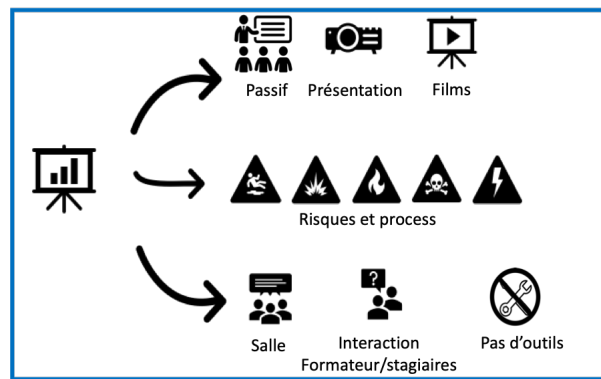


FIGURE 1.4: Formation théorique

D'après les auteurs, il existe plusieurs types de formations (formation initiale, formation de recyclage . . .) mais nous pouvons en retenir deux. D'un côté, il y a la formation théorique. Lors de ces formations, les différentes mesures prises par l'entreprise sont présentées dans une salle sous la forme de films et de présentation par un formateur. Cette formation a un aspect passif car les seules interactions possibles sont entre le formateur et les stagiaires ou les stagiaires eux-mêmes. Aussi, le contenu de ces échanges ne concerne que très peu les outils et les machines à utiliser et aucune démonstration réelle n'est proposée. Cela fait partie du deuxième volet de la formation.

De l'autre, la formation pratique se passe sur terrain ou dans un centre de formation. Elle permet aux opérationnels de prendre connaissance des risques et d'acquérir les compétences nécessaires à l'utilisation des outils. En effet, ces ateliers ont un aspect plus actif. Les stagiaires gardent une interaction avec leur formateur et entre eux. Ils sont également mis en situation réelle représentant leur poste de travail. Ils apprennent donc à utiliser les outils. Certaines situations liées aux risques sur la santé et la sécurité impliquent des formations complémentaires, comme le travail en hauteur, l'habilitation électrique mais également celles liées aux gestes et postures.

Depuis quelques années, d'autres supports viennent compléter les formations dites

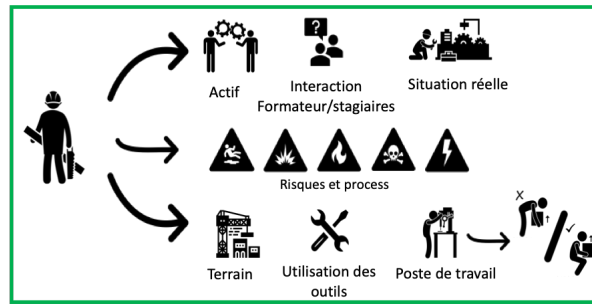


FIGURE 1.5: Formation pratique

classiques. Il s'agit notamment de supports numériques facilitant l'accès aux informations à tout moment. Cet ensemble de dispositifs et d'outils mis en place pour la formation a comme objectif de préparer les salariés à être opérationnels sur le terrain et de garantir une montée en compétences et une adaptation aux nouveaux dispositifs et aux nouvelles dispositions prises par leurs entreprises.

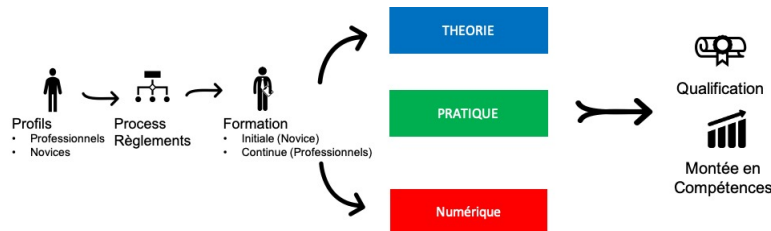


FIGURE 1.6: Formation numérique

Le e-learning fait partie de ces supports numériques. C'est un ensemble de cours ou de modules disponibles en ligne et accessibles depuis n'importe où. Ils peuvent être parcourus en temps réel, à l'aide d'un formateur, ou enregistrés pour un accès ultérieur [Lim *et al.*, 2007]. Kamsin souligne les avantages du e-learning comme la flexibilité, l'apprentissage à un rythme propre à l'apprenti et permettant une meilleure concentration [Kamsin, 2005].

Les industries se sont également intéressées aux jeux sérieux (Serious Game – SG). Le SG est un support permettant d'associer une activité pédagogique en s'appuyant sur le côté divertissant du jeu [Alvarez *et al.*, 2012]. L'objectif est donc de rendre plus attractif le contenu « sérieux » que l'on souhaite aborder en y rajoutant de l'interactivité [Alvarez, 2007].

Le SG a également l'avantage de se décliner sur plusieurs supports (ordinateurs, tablettes ...), de s'exercer en ligne ou hors ligne, seul ou à plusieurs [Wendel *et al.*, 2010].

Le SG entraîne également un changement auprès des participants. En effet, il les motive à accomplir les exercices et génère un sentiment de défi auprès d'eux [Ahmed et

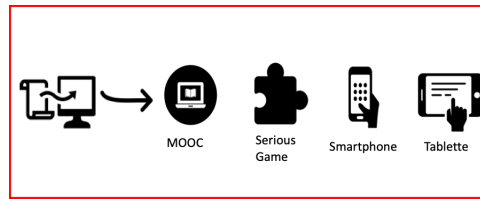


FIGURE 1.7: Outils de formation numérique

Sutton, 2017].

Cependant, les SG développés sur des supports tels que les ordinateurs ou les tablettes restent peu immersifs. En effet, malgré la facilité d'utilisation (clavier/souris, interface tactile . . .), ils restent néanmoins plus compliqués à appréhender car les interactions ne sont pas « naturelles » [Brondi *et al.*, 2016]. Brondi démontre dans son étude que plus de 66% des 24 participants ont largement préférés les expériences en réalité virtuelle, impliquant un casque immersif et des caméras de suivi de mouvements ; les trouvant plus attractives et plus engageantes [Brondi *et al.*, 2016].

Ceci peut s'expliquer également par une étude d'Edgar Dale dans laquelle il établit en 1969 un schéma, appelé « Cône d'apprentissage » (Fig. 1.8) résumant les différents types d'apprentissage ; passif et actif, et le degré d'information retenue après deux semaines (Fig. 1.8) [Dale, 1969; Fartassi, 2020]. Ce schéma a été retravaillé pour intégrer les nouveaux outils de formations.



FIGURE 1.8: Le cône d'apprentissage (revisité) d'Edgar Dale [Source : www.simplilearn.com]

Dale sépare ainsi le fait de « lire », « entendre », « voir » et « regarder un film » de « participer à une discussion » et « simuler une expérience ». Le premier groupe fait par-

tie des formes d'apprentissage passif. Le deuxième groupe fait partie de l'apprentissage actif. Cette étude montre que l'information est mieux retenue quand l'apprenant est dans une forme active d'apprentissage. Le taux de rétention d'information varie entre 10% et 50% dans les formes d'apprentissage passives et atteint les 90% dans les formes d'apprentissage actives, quand on simule une expérience par exemple.

L'une des notions présente dans ce graphique est celle de la « gamification », appelée aussi « ludification ». La gamification est l'intégration de composantes de conception de jeu et des principes de jeu dans un contexte non ludique [Huotari et Hamari, 2012]. Comme le notent Whitton et Moseley, le jeu améliore les processus d'apprentissage, de pratique et d'engagement [Whitton et Moseley, 2012]. Cette approche est également défendue par Gee qui présente les jeux comme étant conçus de manière à déclencher une motivation pour l'apprentissage [Gee, 2005]. Un état de l'art de la « gamification » est proposé par [Hamari *et al.*, 2016].

La gamification du processus de formation dans l'industrie sert donc à attribuer un côté ludique au contenu complexe d'une formation qui peut être ennuyeuse ou rébarbative [Prensky, 2005]. Cela sert à introduire des éléments rappelant le concept de jeu comme un système de récompenses ou de points, la personnalisation par la création d'avatars et le renforcement d'un esprit de compétition.

Ces éléments renforcent un aspect de l'engagement. Il serait donc intéressant de proposer aux compagnons un SG en réalité virtuelle immersive dans lequel ils peuvent se former par le faire, en toute sécurité.

La formation est donc un moyen de former les salariés et de les associer à une culture d'entreprise. Cela passe notamment par une formation théorique, pour poser les bases des règles et procédures propres à l'entreprise, et une formation pratique permettant d'appliquer les acquis. La mise en place d'une formation suit un schéma qu'on pourrait décrire par trois paramètres différents : un profil, un besoin ou un objectif et une modalité d'interaction (Fig. 1.9).



FIGURE 1.9: Méthodologie pour la formation

Dans la construction, la formation sert également à sensibiliser les compagnons aux risques liés à leurs métiers en matière de sécurité et de santé. Les TMS étant la première cause de maladies professionnelles, les acteurs du BTP mettent en place plusieurs solutions afin de former et de sensibiliser les compagnons à ce risque.

Nous pourrions reprendre le schéma précédent et l'adapter à notre contexte (Fig. 1.10).

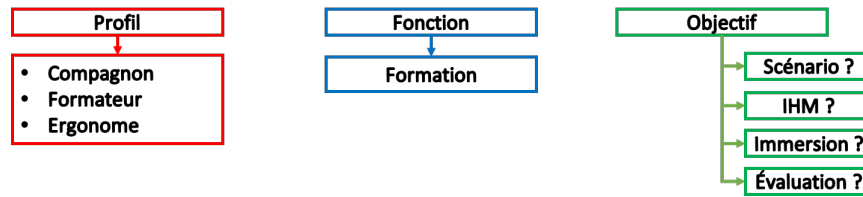


FIGURE 1.10: Méthodologie pour la formation dans la construction

Les différents profils identifiés ont des besoins et des objectifs à atteindre qui peuvent différer. La modalité proposée en face de ces besoins doit répondre aux objectifs qui découlent de ces derniers. Dans notre cas, les profils sont les compagnons, le formateur et l'ergonome. Ils sont tous acteur de la formation mais représentent des instances différentes du modèle. En effet, chaque profil a des besoins différents. Quels seraient donc le scénario, le modalité d'interaction et d'évaluation et le type d'immersion qui doivent être définis pour chaque profil ?

La numérisation des formations fait partie d'une stratégie des entreprises de sortir du schéma classique d'une part, et de rendre l'information accessible et plus ludique d'autre part. L'un des outils qui est largement utilisé dans l'industrie est la réalité virtuelle (RV). La RV est la modalité d'interaction que nous exploiterons dans cette thèse.

Dans le chapitre suivant, nous définirons la RV et introduirons les différents dispositifs disponibles sur le marché. Nous présenterons un état de l'art de son usage dans les différentes industries. Nous présenterons également d'autres systèmes d'interaction basé sur les simulateurs haptiques. Enfin, nous nous concentrerons sur son utilisation dans la construction et présenterons les cas d'usage que nous avons développé pour Bouygues Construction.

Chapitre 2

Formation et Réalité Virtuelle

Sommaire

2.1	Réalité virtuelle : Définition et origines	26
2.2	Immersion et interaction	27
2.2.1	Salles immersives	27
2.2.2	Casque de réalité virtuelle	28
2.2.3	Les casques de réalité virtuelle à trois degrés de liberté	33
2.2.4	Simulateurs haptiques	39
2.3	La réalité virtuelle : Cas d'usage et application	43
2.3.1	Cas d'usage dans l'industrie	43
2.3.2	Cas d'usage dans la construction	49
2.4	La réalité virtuelle chez Bouygues Construction	52
2.4.1	Les salles immersives de Bouygues Construction	52
2.5	La réalité virtuelle pour les ingénieurs du BIM	59
2.6	La réalité virtuelle pour la sensibilisation aux risques sur chantier	61
2.6.1	La chasse aux risques	61
2.6.2	Le travail en hauteur	62
2.6.3	La consommation d'alcool et de drogues	63
2.6.4	Risque électriques	64
2.6.5	La circulation sur chantier	64

Dans le chapitre 1, nous avons présenté la formation, le moyen auquel les entreprises ont recours pour former, entraîner et sensibiliser leurs salariés. Ces formations ont tendance à se numériser de plus en plus. L'un des formats de numérisation est l'usage de la réalité virtuelle (RV) dans le cadre de la formation professionnelle.

Dans ce chapitre, nous définirons la RV et ses origines. Nous présenterons les différentes salles immersives et les différents casques de RV. Nous ferons ensuite un état de l'art des cas d'usage de la RV dans les différents secteurs. Enfin, nous présenterons les cas d'usage de la RV chez Bouygues Construction.

2.1 Réalité virtuelle : Définition et origines

Le terme « Réalité Virtuelle » (*RV*, ou *Virtual Reality – VR*) a été introduit en 1989 par Jaron Lanier [Schroeder, 1993]. Elle est décrite par Fuchs et Moreau [Fuchs *et al.*, 2006] comme un domaine scientifique et technique qui exploite plusieurs compétences telles que l'informatique ou l'électronique. Elle est également présentée par Bourdakis comme étant un environnement artificiel généré par ordinateur et présenté à l'utilisateur qui le perçoit ainsi comme étant réel [Bourdakis, 1997]. Cet environnement fait appel à deux sens essentiels : la vue et l'ouïe.

D'autres notions sont introduites par Woodford [Woodford, 2007] qui décrit la RV comme devant être :

- Interactive : L'environnement créé doit permettre à l'utilisateur d'interagir avec le monde qui l'entoure, comme déplacer des objets par exemple,
- Réaliste : Les paramètres physiques et logiques dans l'environnement ainsi que le rendu visuel doivent être calculés en temps réel,
- Explorable : L'expérience doit permettre à l'utilisateur de visiter l'environnement virtuel et d'interagir avec les objets qui l'entourent,
- Immersive : L'expérience doit mobiliser plusieurs sens de l'utilisateur comme la vue et l'ouïe mais aussi, dans certains cas, l'odorat ou le toucher.

La RV est utilisée dans plusieurs domaines mais s'est révélée au grand public grâce aux jeux vidéo. Après l'échec cuisant de Virtual Boy, la console de jeux sortie en 1995, il a fallu attendre un peu plus de vingt ans pour revoir des casques de RV sur le marché, notamment avec l'Oculus Rift. Depuis, il existe des dispositifs de plus en plus performants permettant de renforcer une notion importante quand on parle de RV ; le sentiment de présence [Sheridan, 1992].

Ce sentiment fait intervenir trois notions [Bouvier, 2009] :

Immersion L'immersion est l'une des composantes principales du sentiment de présence. Elle définit la capacité d'un environnement virtuel à diminuer la perception du monde réel par l'utilisateur en faisant intervenir un ou plusieurs sens. Hecht explique

que, comparé aux anciens systèmes ne faisant intervenir qu'un canal mono-sensoriel, une expérience multi-sensorielle, faisant intervenir notamment la vue, l'ouïe et le toucher, générerait davantage de sentiment de présence [Hecht *et al.*, 2006].

Interaction La notion d'interactivité dans une expérience de RV réside dans la capacité, ou pas, de l'utilisateur à interagir et modifier son environnement. Elle englobe différentes actions telles que le déplacement ou la manipulation. Ces actions peuvent se faire de plusieurs manières ; de l'utilisation du pointeur d'une souris sur une interface graphique, à la reconnaissance de geste par des caméras embarquées en passant par l'utilisation de manettes ou de joysticks.

Imagination Toutes les personnes ne perçoivent pas la RV et ne spatialisent pas les environnements de la même façon. L'imagination est la notion qui permet de générer une réponse émotionnelle forte, comme lors d'études sur les phobies en RV.

Pour renforcer le réalisme et accentuer le sentiment de présence, il existe plusieurs solutions et systèmes de RV. Ces solutions sont mises en place pour améliorer l'expérience de l'utilisateur et lui proposer du contenu riche et divers. Nous présenterons dans la suite les salles immersives, les casques de RV et les simulateurs haptiques.

2.2 Immersion et interaction

2.2.1 Salles immersives

Il existe de nos jours, en France, plusieurs salles de RV dédiées aux acteurs de la construction. On retrouve par exemple la salle « Le Corbusier » du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (Fig. 2.1a) ou la salle du Domolandes (Fig. 2.1b).



(a) La salle « Le Corbusier » du CSTB de Nice



(b) La salle du Domolandes

FIGURE 2.1: Salles immersives pour le bâtiment

Ces salles sont une vitrine de communication avec le grand public pour faire la promotion du savoir-faire des architectes ainsi que les nouvelles méthodes de construction. Elles accueillent également des professionnels de la construction afin de les accompagner dans la conception de leurs projets. Pour une entreprise de construction, visualiser un bâtiment, son aménagement, les effets de lumière et des matériaux et le rendu sonore sont les informations les plus pertinentes. Les interactions se limitent à des modifications d'ambiance ou de variantes d'aménagement ou l'accès à des informations liées aux objets. Pour les architectes, l'esthétisme prend une part très importante. Il est donc préférable d'avoir une bonne qualité de rendu.

Toutes les salles de RV proposent ainsi des caractéristiques qui répondent aux besoins des utilisateurs. Ainsi, ils sont, comme l'exemple des salles décrites plus haut, équipées d'écrans de grandes dimensions, stéréoscopiques et à haute résolution. Il existe plusieurs variantes d'écran comme l'écran courbé présent dans la salle « le Corbusier » ou des écrans plat comme dans la salle du Domolandes.

Ces salles sont prévues pour un usage tourné essentiellement vers la visualisation. Elles ne proposent pas d'accompagner les ingénieurs lors de la conception car elles ne sont pas munies des logiciels métiers. D'autres supports sont disponibles permettant une installation moins lourdes que les salles immersives. Il s'agit des casques de RV.

2.2.2 Casque de réalité virtuelle

La RV est une technologie informatique permettant d'immerger un utilisateur dans un environnement généré par un ordinateur. L'environnement créé par la RV est un environnement dans lequel l'utilisateur peut interagir de plusieurs façons différentes. Ainsi, selon Fuchs, l'objectif de la RV est de permettre à une ou plusieurs personnes de mener une expérience sensori-motrice et cognitive dans un environnement immersif ou pas qui peut être « imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel » [Fuchs *et al.*, 2006]. Cette immersion est une expérience multisensorielle qui peut faire intervenir le toucher, l'odorat, l'ouïe mais surtout la vue.

Premiers casques de réalité virtuelle

La RV est une technologie dont l'usage est largement répandu dans plusieurs industries. Cela dit, la RV n'est pas aussi récente que l'on pourrait le croire. En effet, la première expérience de RV remonte aux années soixante. C'est en 1962 que Morton Heilig présente son simulateur Sensorama (Fig. 2.2) [Heilig, 1962].



FIGURE 2.2: Le simulateur Sensorama [Source : www.engadget.com]

Dans le simulateur, l'utilisateur vit l'expérience d'une promenade à vélo dans la ville de New-York. Les images sont projetées sur un écran grand angle. Des systèmes sont placés pour plus d'immersion comme un diffuseur d'odeur, un ventilateur pour simuler le vent ou encore un siège vibrant pour ressentir les vibrations du vélo.

Morton Heilig souhaitait apporter à tous les foyers une façon nouvelle de regarder le contenu diffusé à la télévision. On trouve d'ailleurs plusieurs croquis de casques dans les brevets déposés par Heilig qui ressemblent fortement aux casques disponibles actuellement sur le marché [Heilig, 1960].

Les travaux de Heilig ont inspiré d'autres inventions. En 1965, Ivan Sutherland proposait le premier visiocasque [Sutherland, 1965]. Connue sous le nom d'« ultime écran » (« The Ultimate Display »), c'est en 1968 qu'eut lieu la première démonstration (Fig. 2.3).



FIGURE 2.3: The ultimate display d'Ivan Sutherland [Source : www.ulyces.co]

Le casque embarque un écran stéréoscopique permettant l’affichage de formes simples et, en fonction des mouvements de la tête de l’utilisateur, d’afficher différentes perspectives. Cela dit, le casque portait également le nom d’« épée de Damoclès », en raison de son poids très lourds et de la nécessité de l’accrocher au plafond par le biais d’un bras mécanisé.

En 1982, des travaux d’un ingénieur de l’armée aboutissent au développement du « Super Cockpit » (Visually Coupled Airborne Systems Simulator – VCASS)(Fig. 2.4).



FIGURE 2.4: Le Super Cockpit développé par l’ingénieur Thomas Furness [Source : www.realite-virtuelle.com]

L’appareil à pour objectif de former les pilotes des avions de combat en leur présentant des informations importantes. Il détectait également les mouvements de la tête et acceptait des commandes vocales.

La National Aeronautics and Space Administration (NASA) s’intéressa également à la RV. En 1985, elle présenta son « Virtual Interface Environment Workstation » (VIEW) (Fig. 2.5). Ce système utilise la RV stéréoscopique. Il offrait un angle de vue



FIGURE 2.5: Le VIEW – Casque de RV développé par la NASA [Source : www.nasa.gov]

verticale de 120° grâce à deux écrans LCD de 2,7 " de diagonale. Le casque intégrait également un système de reconnaissance vocale et les gants « Dataglove » de « VPL Research ».

Jusque là, les développements des casques de RV étaient exclusivement réservés aux industries et se faisaient dans les laboratoires de recherches. C'est dans les années 1990 que la RV devient accessible au grand public. En 1993, SEGA, la société japonaise de développement et d'édition de jeux vidéo, présenta le « Sega VR » (Fig. 2.6) lors d'un évènement consacré aux nouvelles technologies. Il est doté d'écrans LCD, de capteurs



FIGURE 2.6: Le Sega VR – Casque de RV dédié au grand public développé par Sega [Source : www.realite-virtuelle.com]

inertiels pour évaluer les mouvement de la tête. Deux versions du casque étaient prévues : un pour l'arcade et un pour les consoles de salon. Ce dernier ne fut, cela dit, jamais commercialisé.

L'histoire de la RV a connu un grand échec au milieux des années 90. La société de jeux vidéo Nintendo lance en 1995 son « Virtual Boy » (Fig. 2.7). Il s'agit d'une console



FIGURE 2.7: Le Virtual Boy – Casque de RV dédié au grand public développé par Nintendo [Source : www.wikipedia.org]

prenant la forme d'un casque de RV. Il permet d'afficher un EV mais il démultiplie les

défauts. En effet, l’affichage ne se fait qu’en nuance de rouge et noir. Ensuite, la résolution d’écran est insuffisante. L’image n’est pas réellement en 3D. Le casque bénéficie d’un effet de relief grâce au décalage que permettent les deux écrans indépendants du casque. Enfin, étant trop lourd pour être porté, il repose sur des pieds. Il ne propose donc pas de suivi des mouvements de la tête, causant ainsi des cinétoses provoquant maux de tête et nausées chez les utilisateurs. La firme a eu beaucoup de mal à fidéliser les utilisateurs dû également, à un catalogue de jeux réduit.

Cet échec marqua la mise en veille des projets de RV jusqu’au début des années 2000.

Évolution des casques de réalité virtuelle

Depuis 2012, les casques de RV sont de plus en plus répandus. L’objectif d’un casque de RV est de proposer une vision stéréoscopique grâce à deux petits écrans, un champs de vision grand angle qui correspond au champs visuel de l’utilisateur et une immersion visuelle [Fuchs, 2017]. Les casques de RV ont l’avantage, par rapport à d’autres dispositifs de visualisation, de proposer un système dont les caractéristiques correspondent aux capacités du système visuel humain. Ainsi, par rapport à un écran classique, un casque de RV offre :

- Un grand champ de vision autant horizontal que vertical,
- Une vision stéréoscopique permettant une perception du relief à partir de deux images planes,
- Une haute résolution graphique,
- Une immersion visuelle.

Ces dernières années, plusieurs casques ont été développés et commercialisés. Ces casques, en dehors de la qualité d’affichage ou des systèmes de suivi qui y sont associés, se différencient par le degré de liberté (DdL ou Degree of Freedom – DoF) qu’ils proposent.

Le DdL (ou DoF) désigne les mouvements possibles autour ou le long d’un axe donné. Si on prend en compte les articulations du bras, sans compter la main, celui-ci peut être représenté comme un opérateur à sept DdL (trois DdL pour l’épaule, un DdL pour le coude et trois DdL pour le poignet). Les objets qui nous entourent peuvent se déplacer, ou être déplacés, dans l’espace 3D en suivant trois axes de translation et trois axes de rotation. Le monde qui nous entoure a donc six DdL.

Dans la RV, les DdL représentent l’axe suivi. Cela correspond à la possibilité du casque d’observer un changement dans une ou plusieurs directions, en matière d’angle ou de distance. Il existe ainsi des casques de RV à trois DdL et à six DdL. Ceci correspond

donc à la capacité matérielle de détecter des changements de rotation pour l'un, et des changements de rotation et de direction pour l'autre (Fig. 2.8).

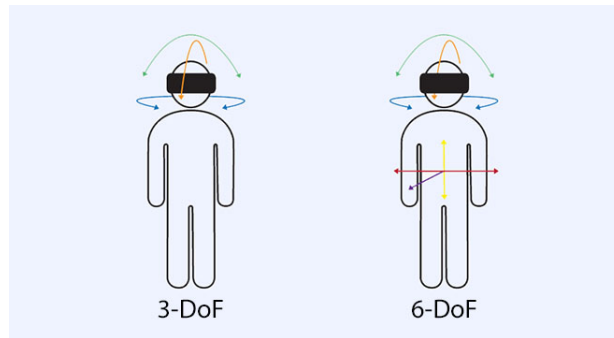


FIGURE 2.8: Différence entre trois DdL et six DdL [Source : www.virtualspeech.com]

Ces casques se différencient par rapport aux casques développés dans les années 90 par la possibilité de suivi des mouvements de la tête et pour certains, la possibilité de se déplacer librement dans un espace donné (6-DOF).

2.2.3 Les casques de réalité virtuelle à trois degrés de liberté

Les casques à trois DdL suivent le changement d'angle d'un objet autour des trois axes de rotation ; x , y et z . Ainsi, avec un casque de RV, on peut observer si l'utilisateur :

- Regarde à gauche ou à droite,
- Penche la tête vers le haut ou vers le bas,
- Pivote à gauche ou à droite.

Cela dit, les mouvements de translation ne sont pas suivis. Le casque n'est pas capable de déterminer si oui ou non, la personne se déplace physiquement dans l'environnement virtuel. Le point d'observation de départ ne bouge donc pas.

Il existe plusieurs modèles de casque de RV à trois DdL, des plus simples au plus perfectionnés.

C'est en 2012 qu'est né la première version de l'« Oculus Rift » (Fig. 2.9).

Le casque est constitué d'un écran LCD de 7" permettant d'afficher une image réaliste, ainsi que d'un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre. Ces capteurs permettent de suivre les mouvements de la tête. Cela dit, pour se déplacer dans l'EV, il faut se munir d'un clavier et d'une souris ou d'une manette. Le suivi des déplacements n'est pas assuré. Malgré le progrès en matière d'affichage, ce mode de déplacement peut créer chez certains utilisateurs un certain malaise avec les applications impliquant de



FIGURE 2.9: La première version de l'Oculus Rift [Source : www.realite-virtuelle.com]

bouger dans l'EV. A son déploiement, l'Oculus Rift reste, financièrement, inaccessible à un public large et est plutôt réservé aux industriels et aux chercheurs (599 \$).

C'est en 2014 que Google propose un casque à petit prix et facile à fabriquer (Fig. 2.10a). Il suffit de mettre un smartphone dans la fente prévue pour, de lancer un contenu RV et de profiter de l'expérience.



(a) Google Cardboard [Source : <https://arvr.google.com>]



(b) Samsung Gear VR [Source : www.samsung.com]

FIGURE 2.10: Les casques de réalité virtuelle à trois degrés de liberté

Un autre casque proposé par Samsung nécessite également un smartphone, et dans sa dernière version, il est équipé d'une télécommande permettant d'interagir avec le contenu (Fig. 2.10b).

Les casques à trois DdL sont essentiellement conçus pour les téléphones mobiles. Les applications développées proposent à l'utilisateur une visualisation ou une interaction avec un environnement RV dans lequel seul les rotations sont captées par le casque. Pour cela, ces casques se reposent généralement sur des capteurs intégrés de type accéléromètres, gyroscopes et magnétomètres, pour se repérer dans l'espace. Ces casques ont également la particularité d'être accessibles au grand public, se basant sur le smartphone, un dispositif largement répandu.

Cela dit, l'immersion peut être très vite limitée car les interactions sont limitées. D'autres casques de RV ont ainsi vu le jour, intégrant la possibilité de se déplacer dans l'espace et plus d'interactions. Il s'agit des casques à six DdL.

Les casques de réalité virtuelle à six degrés de liberté

Les casques à six DdL suivent le changement de position et de rotation d'un objet sur les trois axes, détectant ainsi six mouvements. Comme les casques à trois DdL, ils sont capables de détecter en rotation si l'utilisateur :

- Penche la tête à droite et à gauche,
- Tourne la tête à droite et à gauche,
- Penche la tête en haut et en bas.

Mais la nouveauté est qu'ils sont capables de détecter en translation si l'utilisateur :

- Se déplace vers l'avant ou vers l'arrière,
- Glisse à gauche ou à droite,
- Monte ou descend.

Ils sont en général accompagnés de manettes pour interagir avec l'EV.

Ces casques sont équipés de plusieurs capteurs pour détecter ces différents mouvements sur les six axes. Ces capteurs sont couplés à des dispositifs de détection et de suivi des casques et des manettes. Dans le cas du HTC Vive (Fig. 2.11), les « Lighthouse » (les phares) sont responsables du suivi de casque dans l'espace. Ainsi, chaque lighthouse est équipée d'un groupe de LED infrarouge, d'un laser à balayage horizontal et un autre à balayage vertical. Chaque fois qu'un laser rencontre un capteur, un algorithme est utilisé pour déterminer l'orientation et la distance du casque. Ce type de casque nécessite



FIGURE 2.11: Le casque de RV HTC Vive avec ses manettes et ses « Lighthouse » [Source : www.realite-virtuelle.com]

un ordinateur. En effet, le calcul de rendu est déporté. Tout est fait par l'ordinateur,

et le casque ne sert « que » de visionneuse. Il est donc nécessaire, pour une expérience optimale, d'avoir des ordinateurs équipés de cartes graphiques puissantes. Cela restreint donc le nombre d'utilisateurs lambda car ces ordinateurs restent onéreux.

Ces dernières années, de nouveaux types de casques sont apparus sur le marché. Ces casques ont deux particularités. La première est qu'ils sont autonomes. Ils n'ont pas besoin d'ordinateur pour fonctionner. Le calcul est fait directement dans le casque qui est équipé de processeurs et de puces graphiques pour la gestion du rendu. La deuxième particularité est la possibilité pour la plupart d'offrir six DdL. C'est le cas de l'Oculus Quest ou du HTC Vive Focus plus (Fig. 2.12).



(a) Le casque de RV Oculus Quest [Source : www.realite-virtuelle.com]



(b) Le casque de RV HTC Vive Focus Plus [Source : www.realite-virtuelle.com]

FIGURE 2.12: Les casques de RV utilisés dans la salle Arcas

Ces casques sont moins chers et offrent de meilleures possibilités de mobilités car ils ne nécessitent aucun équipement externe. Ils sont ainsi destinés au grand public pour jouer à des jeux vidéos mais également aux industriels pour déployer la RV à moindre coût.

Ces dispositifs, comme expliqué précédemment, sont livrés en général avec des manettes pour assurer l'interaction avec l'EV. Depuis des années, des recherches sont menées pour s'affranchir de ces systèmes et offrir à l'utilisateur plus d'immersion en proposant des outils reproduisant la gestuelle réelle.

L'interaction dans la réalité virtuelle

L'immersion offerte par les casques de RV est surtout visuelle. Les nouvelles générations de casques permettent d'interagir avec l'EV à l'aide de manettes équipées de capteurs. Cela dit, les chercheurs travaillent depuis longtemps sur l'intégration de dispositifs permettant d'interagir plus naturellement avec les objets virtuels. C'est en 1987 que la société VPL a développé les gants « DataGlove » (Fig. 2.13). Ces gants ont la particularité de permettre à l'utilisateur de visualiser ses mains dans la RV et d'agir « naturellement » avec les objets qui l'entourent. Ces gants ont d'ailleurs été utilisés par la NASA avec leur casque de RV (Le « VIEW »). Ce gant est capable de reconnaître



FIGURE 2.13: Les gants Data Glove de la société VPL [Source : www.realite-virtuelle.com]

256 positions pour chaque doigt et peut détecter les mouvement de la main sur le plan du roulis, du lacet et du tangage.

Inspiré par ces gants, et aidés par ces développeurs Tom Zimmerman et Jaron Lanier, les ingénieurs de Nintendo ont développé en 1989 le « Power Glove » (Fig. 2.14).



FIGURE 2.14: Le Nintendo Power Glove [Source : www.wikipedia.org]

Il était destiné au grand public et permettait de mesurer quatre position pour chaque doigt. Il était cela dit limité au plan du roulis et du lacet. Cela fut un échec car trop limité.

En plus du sens du toucher, les premières expériences RV manquaient également de liberté de déplacement. Les chercheurs se sont intéressés à des dispositifs permettant un déplacement naturel.

Ainsi, en 2013, la société « Virtuix » développe le « Omni », un tapis roulant omni-directionnel (Fig. 2.15).

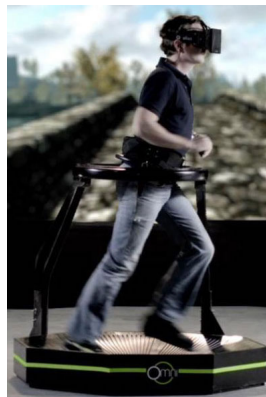


FIGURE 2.15: Le tapis roulant Omni par Virtuix [Source : www.wikipedia.org]

L'utilisateur est attaché au niveau de la ceinture et peut ainsi marcher librement et naturellement dans un EV, sans limites d'espace réel.

Ces expériences tendent à immerger l'utilisateur dans l'EV et lui faire vivre une expérience proche de la réalité.

Les fabricants de casques se sont également intéressés à l'intégration d'objets réels dans l'EV. Ainsi, la société HTC a développé les « Vive Tracker » qui permettent, une fois fixés sur l'objet, de l'« intégrer » et pouvoir le déplacer (Fig. 2.16).



FIGURE 2.16: Le Vive Tracker [Source : www.vive.com]

Il est également possible de les placer sur le corps de l'utilisateur pour recréer son squelette dans l'EV, faire de la capture de mouvement et animer un avatar (Fig.2.17).



FIGURE 2.17: Capture de mouvement d'une danseuse grâce au Vive Tracker et animation d'un avatar en EV [Source : www.roadtovr.com]

Tous ces dispositifs ainsi que les notions d'immersion, d'interaction et d'imagination définies dans la section 2.1 viennent alimenter un objectif que l'on souhaite atteindre lors du développement d'une expérience de RV. Cet objectif est le réalisme, qui est très couramment associé à l'EV. Le réalisme est fortement lié à la notion de fidélité. En effet, une définition couramment acceptée est liée à l'objectif de présenter le monde tel qu'il est. La notion de présence va plus loin que celle du réalisme car elle tend à éliminer la barrière entre le virtuel et le réel.

Pour renforcer le réalisme et accentuer le sentiment de présence, il existe des solutions qui proposent, en plus de l'immersion visuelle, une immersion tactile en assurant un retour de force.

2.2.4 Simulateurs haptiques

La notion d'interaction, composante importante dans la sensation de présence, fait intervenir différents canaux sensoriels. Les outils de RV les plus répandus misent essentiellement sur l'immersion visuelle, par l'affichage stéréoscopique en 3 dimensions, et l'immersion auditive, par l'interactivité ou la spatialisation du son. Des recherches, encore au premier stade, intègrent également des sensations olfactives et gustatives [Burdea et Coiffet, 2003].

Cependant, le sens du toucher est de plus en plus pris en compte et intégré dans les applications immersives [Burdea et Coiffet, 2003]. En effet, les simulateurs comprenant des plateformes à retour haptique sont reconnues et utilisées pour reproduire des situations réelles nécessitant une manipulation manuelle [Burdea, 1999].

Burdea décrit le retour haptique comme regroupant les modalités de retour de force, retour tactile et le retour proprioceptif [Burdea, 1999]. Le retour de force renvoie des informations tels que le poids ou la texture d'un objet virtuel. Le tactile permet à l'utilisateur d'obtenir les caractéristiques surfaciques, la géométrie, la régularité ou la température de l'objet. Le retour proprioceptif quant à lui renseigne sur la position ou la posture du corps de l'utilisateur.

Un historique des premières applications en RV intégrant un dispositif de retour haptique est décrit par l'auteur dans son article [Burdea, 1999]. Burdea et Coiffet soutiennent que rajouter du retour haptique dans une expérience immersive amplifie considérablement le réalisme de la simulation [Burdea et Coiffet, 2003]. Dans leur livre, ils s'attardent sur les sensations au niveau de la main, partie du corps ayant la plus grande densité de récepteurs tactiles. Ils expliquent notamment que selon l'effort appliqué par l'utilisateur, la réponse neurologique se fait soit par les récepteurs tactiles pour les appuis légers, soit par réponse kinesthésique au niveau des muscles et des os pour les appuis plus importants.

En interaction homme-machine, le retour d'information visuel et sonore s'avère efficace et permet aux utilisateurs d'accomplir un certain nombre de tâches. Cependant, si l'intensité des tâches augmente, cela ne suffit plus [Jensen *et al.*, 2011].

Les interfaces à retour de forces doivent être pensées de manière à ne pas causer d'accidents lors de l'utilisation. Elles doivent donc être fixées de manière rigide pour éviter tout mouvement imprévu. L'exemple le plus commun, décrit par les auteurs, est celui des gants à retour de force, qui eux sont fixées sur l'avant-bras de l'utilisateur [Burdea et Coiffet, 2003].

Plusieurs industriels et chercheurs se sont intéressés aux simulateurs haptiques.

Les exemples de simulateurs haptiques

L'objectif d'une expérience en RV est la stimulation multisensorielle de l'utilisateur, lui permettant de se sentir présent dans un EV. Dans le monde réel, l'être humain se repose sur ses sens visuel, auditif et haptique pour percevoir le monde qui l'entoure. Les dispositifs de RV, et notamment les casques de RV, permettent de vivre l'expérience visuellement grâce aux écrans, et auditivement grâce aux écouteurs. Cela dit, ces systèmes ne fournissent aujourd'hui qu'un semblant de sensation haptique [Zenner et Krüger, 2019].

Plusieurs cas d'usage incluant des simulateurs haptiques ont vu le jour. On trouve par exemple, des simulateurs automobiles. Jensen présente un simulateur de conduite basé sur des écrans et un modèle simple de véhicule, avec le siège, le volant et les pédales [Jensen *et al.*, 2011]. Ce simulateur est utilisé pour mesurer les temps de réponses d'un utilisateur devant éviter un obstacle.

Les simulateurs haptiques sont largement utilisés en médecine, pour la formation des chirurgiens ou des dentistes. Wang décrit dans son article [Wang *et al.*, 2006] une simulation d'une opération en neurochirurgie associant RV et retour haptique (Fig. 2.18)



(a) L'interface à retour de force du simulateur



(b) Vue du simulateur virtuelle lors d'une coupe

FIGURE 2.18: Le simulateur de neurochirurgie alliant RV et retour de force [Wang *et al.*, 2006]

L'auteur conclut que l'utilisation d'un tel système pourrait atteindre un degré de réalisme assez important pour être utilisé pour la formation des neurochirurgiens.

Pour la médecine dentaire, Roy stipule que des systèmes à retour de force associés à la RV pourraient venir compléter les méthodes de formation traditionnelles des dentistes [Roy *et al.*, 2017]. Pohlenz a mené des études auprès de 53 étudiants en médecine dentaire. Il proposait un simulateur de préparation à l'implantologie dentaire. Les résultats de son étude montre que plus de 92% des participants recommandent l'utilisation de ce type d'outil pour la formation et que plus de 81% d'entre eux estiment que le simulateur est bon ou très bon et assez réaliste [Pohlenz *et al.*, 2010].

L'association d'une plateforme à retour de force avec de la RV est largement utilisée dans la réhabilitation des patients. On peut trouver par exemple, les travaux de Frisoli qui présente un système de neuro-réhabilitation basé sur un exosquelette et un EV dont les scénarios sont imaginés par des thérapeutes spécialisés. Il a évalué son système auprès de huit patients atteints d'un accident vasculaire cérébrale (AVC). Les résultats sont prometteurs et l'auteur conclut que ce système apporte un avantage considérable dans le rétablissement des fonctions des membres supérieurs [Frisoli *et al.*, 2009].

Pouvrasseur *et al.* présentent *Virtual Fauteuil* (Fig. 2.19).



FIGURE 2.19: Le simulateur Virtual Fauteuil [Pouvrasseur *et al.*, 2017]

Le simulateur a plusieurs intérêts. Nous pouvons réutiliser le schéma utilisé en chapitre 1 (Fig. 2.20).



FIGURE 2.20: Modèle pour *Virtual Fauteuil*

Il est possible de définir plusieurs instances selon ses profils. Tout d'abord, il permet une prise de conscience des personnes valides des problématiques d'accessibilité des personnes à mobilité réduite (PMR) (Fig. 2.21).

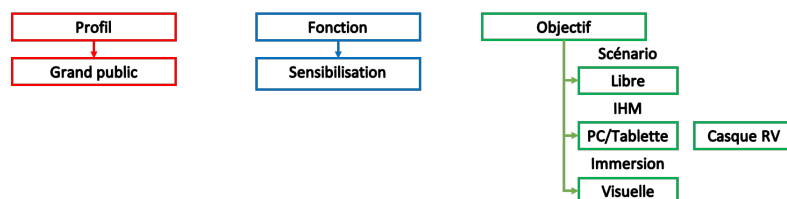


FIGURE 2.21: Modèle pour *Virtual Fauteuil* – Grand public

L'utilisation de la RV dans un scénario libre, sur ordinateur ou dans un casque, peut contribuer à répondre à ce besoin.

Ensuite, le simulateur pourrait être utilisé pour étudier les accès aux structures publiques et proposer des améliorations d'aménagement quand cela est nécessaire (Fig. 2.22). Le profil de cette instance est l'architecte et dans ce cas aussi, la moda-

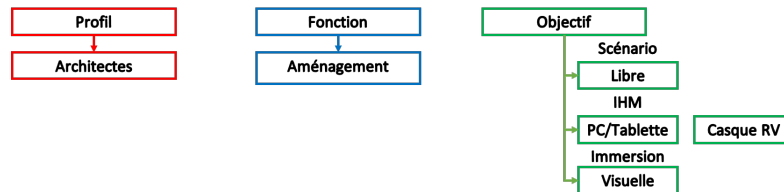


FIGURE 2.22: Modèle pour *Virtual Fauteuil* – Architectes

lité d'interaction peut être purement visuelle.

Enfin, *Virtual Fauteuil* offre un outil de formation à l'utilisation de fauteuil roulant, permettant à une PMR de s'entraîner dans divers scénarios proposés par un thérapeute [Pouvrasseur *et al.*, 2017].

Ici, nous pouvons définir deux instances différentes. La première est une instance liée à la PMR (Fig.2.23).

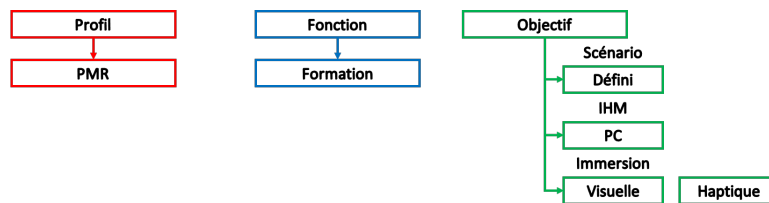


FIGURE 2.23: Modèle pour *Virtual Fauteuil* – PMR

Dans ce cas, le profil a un besoin de formation, donc un besoin de réalisme. Pour cela, un immersion visuelle ne suffit pas. Il a besoin de savoir comment manœuvrer son fauteuil selon la nature du terrain (dévers, montée, descente...), et la nature de l'effort requis lors du déplacement. Un retour haptique est donc nécessaire et a été pensé pour la plateforme.

L'autre instance est celle dont le profil est l'ergothérapeute (Fig. 2.24).

L'objectif de l'ergothérapeute est d'étudier le mouvement indépendamment de l'interface d'interaction. Cela dit, la présence d'haptique est utile pour étudier les contraintes liées aux efforts pour analyser les TMS.

L'étude menée auprès de thérapeutes et de PMR montre ainsi que l'impact de la formation en matière de réalisme est plus important quand l'impression de conduire un

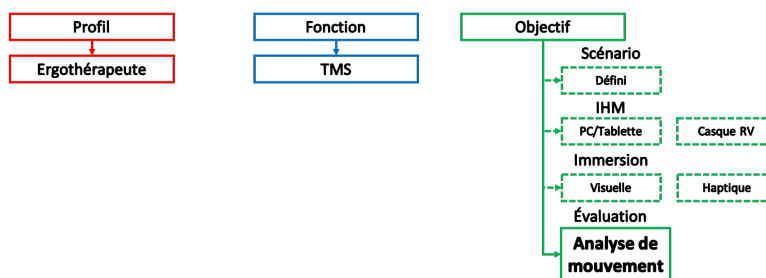


FIGURE 2.24: Modèle pour *Virtual Fauteuil* – Ergothérapeute

vrai fauteuil roulant est présente, et que donc un retour haptique en plus du retour visuel du simulateur est intéressant.

La RV et la RV associée à des simulateurs haptiques représentent donc des outils intéressants que les industries peuvent exploiter pour créer des contenus qui répondent à leurs besoins. D'ailleurs, la démocratisation de la RV, qui s'est affranchi de son image de « gadget » assimilé aux jeux vidéo, a permis l'apparition de plusieurs cas d'usage dans l'industrie, traitant des sujets allant de la simple visualisation à la formation sur des opérations complexes en passant par les séances de sensibilisation santé et sécurité [Kuntz *et al.*, 2018].

2.3 La réalité virtuelle : Cas d'usage et application

2.3.1 Cas d'usage dans l'industrie

L'utilisation de la RV est largement exploitée dans l'industrie. Berg et Vance décrivent ainsi l'utilisation de la RV pour la production et la validation de concept [Berg et Vance, 2017a]. Dans un second article, Berg et Vance présentent d'autres usages comme la validation esthétique des produits, l'étude d'ergonomie fonctionnelle (Étudier la visibilité, l'accessibilité. . .) ainsi que la visualisation de données brutes des maquettes 3D [Berg et Vance, 2017b].

Les auteurs de [Kozlak *et al.*, 2013] parlent également de « formation par le faire » dans un environnement virtuel contrôlé et sécurisé. Le stagiaire peut ainsi bénéficier d'instructions concernant des procédures d'assemblage, de contrôle et de maintenance ou de procédures de sécurité basées sur des données réelles [Kozlak *et al.*, 2013; Mujber *et al.*, 2004].

Dans le secteur de l'automobile, et depuis le passage aux outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), l'usage de la RV est largement répandu [Xiao *et al.*, 2001].

La RV est utilisée par l'industrie automobile dans plusieurs processus de prototypage (Fig. 2.25). On parle de Design Assisté par Réalité Virtuelle (DARV) [Zimmermann, 2008]. Zimmermann soutient ainsi que l'étape de « prototypage virtuel » remplacera l'approche traditionnelle, basée sur un modèle physique, dans un processus itératif.

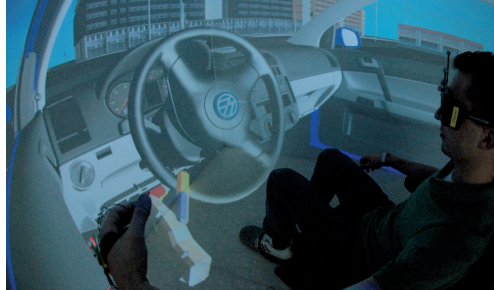


FIGURE 2.25: Prototypage virtuel [Zimmermann, 2008]

L'auteur décrit les différents processus pouvant être « virtualisés ». Ainsi, la RV peut être utilisée pour la visualisation d'un modèle numérique utilisé pour la prise de décision avant la construction d'un prototype physique [Zimmermann, 2008]. D'autres aspects comme l'ergonomie, la formation et l'assistance lors de l'assemblage sont présentés par l'auteur et une comparaison est établie entre la méthode traditionnelle et la méthode utilisant la RV.

Il conclut que cette dernière représente un avantage par rapport au processus classique car elle permet de réduire les délais de mise sur le marché et les coûts du processus de développement des produits [Zimmermann, 2008].

Stork appuie les propos de Zimmermann et met en lumière également l'importance de la RV pour les formations à l'assemblage (Fig. 2.26).

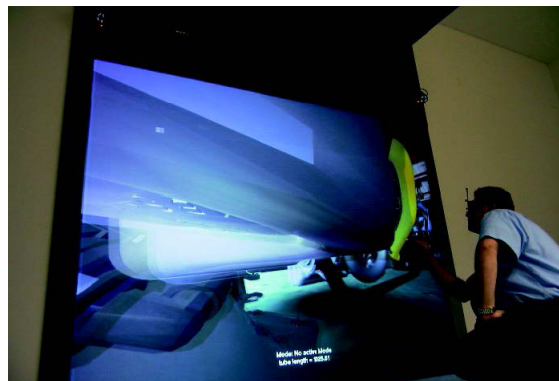


FIGURE 2.26: Formation à l'assemblage dans le secteur automobile [Zimmermann, 2008]

Il stipule que la RV peut faciliter la compréhension de données 3D issues de plusieurs sources en les intégrant dans un environnement compréhensible par l'homme, dans lequel ce dernier peut interagir et se former [Stork *et al.*, 2012] .

Kemeny présente l'utilisation de la RV chez Renault avec d'un côté la revue de maquette mais également l'utilisation des casques de RV associés à des plateformes de mouvement pour étudier l'ergonomie ou les simulations de conduites réalistes (Fig. 2.27) [Kemeny, 2014].



(a) Revue de maquette



(b) Simulateur de conduite

FIGURE 2.27: Utilisation de la RV chez Renault [Kemeny, 2014]

La RV permet également de faire essayer aux futurs clients en toute sécurité et de façon réaliste des prototypes et ainsi avoir une idée de l'expérience utilisateur (Fig. 2.28) [Liangxu, 2002].



FIGURE 2.28: Évaluation de l'ergonomie d'un véhicule [Zimmermann, 2008]

Les concessionnaires automobiles l'utilisent également dans leurs showrooms. La RV permet au futur acquéreur d'avoir une vision de l'intérieur et de l'extérieur du véhicule et de choisir les différentes options et de le personnaliser (Fig. 2.29).



(a) Personnalisation de l'extérieur du véhicule



(b) Personnalisation de l'intérieur du véhicule

FIGURE 2.29: Outil de personnalisation de véhicule [Source : www.3dvf.com]

La RV peut également servir pour tester de nouvelles technologies développées par l'industrie comme les véhicules autonomes [Kemeny, 2014].

La RV est également utilisée dans l'industrie aéronautique. Elle est essentiellement utilisée pour la formation à la maintenance des engins [Amundarain *et al.*, 2004].

Dans ces processus de maintenance, l'importance se situe dans l'analyse des tâches d'accessibilité des opérateurs et de leurs outils. Cela permet ainsi de mesurer les temps de montage et de démontage et de prédire les schémas d'intervention (Fig. 2.30)[Savall *et al.*, 2002].

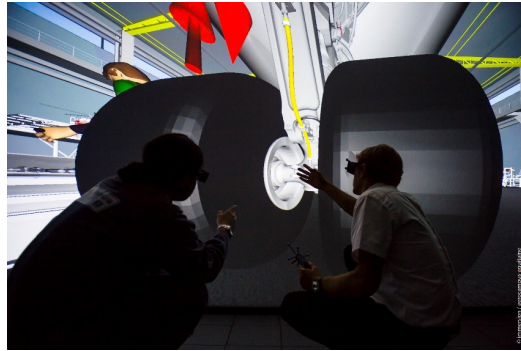


FIGURE 2.30: Formation à la maintenance en aéronautique [Source : www.engineering.com]

Pour cela, la plupart des simulateurs développés incluent une visualisation et une assistance assurée par la RV et une stimulation tactile assurée par des modèles physiques remplaçant les maquettes réelles des engins étudiés [Amundarain *et al.*, 2004; Lécuyer *et al.*, 2001; Savall *et al.*, 2002]. Lécuyer soutient ainsi que l'utilisation d'interfaces haptiques raccourcit le cycle de développement d'une part, et permet aux opérateurs de maintenance d'interagir avec les maquettes virtuelles et de ressentir les efforts physiques auxquels ils sont habitués.

D'autres simulateurs alliant RV et simulateur haptique sont utilisés pour la simulation de vol et l'entraînement des pilotes, parfois dans des environnements particuliers (pas de plan au sol par exemple) [Beckman, 1993].

D'ailleurs, le premier simulateur de vol « *Link Trainer* » basé sur un modèle d'avion associé à la RV, conçu par Edwin Link en 1931 [Link, 1931] et utilisé pour la formation des pilotes et des militaires pendant la seconde guerre mondiale (Fig. 2.31)[Jeon, 2015].

Dans le secteur de la défense, la RV a différents usages. Le premier usage est de permettre aux militaires de se rendre compte de la réalité terrain de leurs missions [Lele, 2013], apprendre à intervenir sur des situations inspirées de leurs quotidiens, comme des situations rares, s'entraîner en équipe et préparer les opérations terrain [Moshell, 1993].

Lele stipule ainsi que la RV permet de simuler différents risques et manœuvres délicates qu'il serait difficile à concevoir dans l'environnement réel. L'auteur explique aussi



FIGURE 2.31: Le simulateur *Link Trainer* d’Edwin Link [Source : en.wikipedia.org]

que la RV permettrait d’envisager plusieurs scénarios, comme le changement de météo ou le dysfonctionnement des outils sans mettre en danger la vie des soldats ni toucher aux équipements existants [Lele, 2013].

Koźlak défend également cette approche en stipulant que la RV a plusieurs avantages [Koźlak *et al.*, 2013]. Le premier étant la répétabilité. Chaque mission peut être répétée et enregistrée afin d’analyser le comportement des soldats. Le deuxième avantage est de pouvoir créer des formations dangereuses en environnements sûrs. Des scénarios peu risqués peuvent être donc conçus sans mettre en danger la santé et la sécurité des soldats. Le coût de mise en place de ces formations est un avantage conséquent mis en avant par l’auteur. Les besoins matériels sont moindres si la formation est dispensée en RV. Koźlak note aussi que la RV permet un transfert des connaissances et une évaluation comportementale des soldats. En effet, il est possible de capitaliser sur l’expertise terrain des militaires pour mettre en place des formations pour les jeunes recrues, ainsi que d’évaluer leurs comportements et leur processus de prise de décision dans les situations de combats dangereuses [Koźlak *et al.*, 2013]. La RV peut également servir pour la



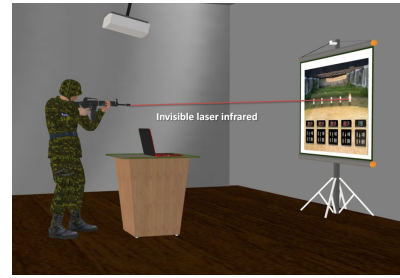
FIGURE 2.32: Formation des militaires [Koźlak *et al.*, 2013]

formation de tir des soldats (Fig. 2.33) [Bhagat *et al.*, 2016]. Cette solution, basée sur plusieurs répliques d’armes, un laser infrarouge invisible et un environnement virtuel, est plus économique. L’étude menée montre que les apprentis ayant utilisé l’apprentissage en 3D ont de meilleurs résultats que ceux entraînés par la méthode classique (terrain)

en matière de résultats de formation, de motivation et de performance [Bhagat *et al.*, 2016].



(a) Formation au tir sur terrain



(b) Formation au tir en RV

FIGURE 2.33: Formation au tir – Classique/RV

Les simulateurs alliant RV et plateforme robotique sont également utilisés dans le domaine de la défense, notamment pour former les pilotes d'avions [Moshell, 1993]. D'après Moshell, la RV permet de former en toute sécurité et à moindre coût les pilotes. Aussi, le manque d'environnement adéquat serait une raison supplémentaire d'avoir recours à la RV. Cela permettrait donc de s'entraîner à de nouvelles tactiques, d'essayer de nouvelles armes, d'étudier les procédures d'urgences et les combats aériens [Moshell, 1993].

Un dernier aspect de l'utilisation de la RV dans le domaine militaire est abordé par Rizzo, qui a utilisé la RV pour soigner des personnes ayant été exposées aux guerres et différentes attaques terroristes et ayant développée des Troubles de Stress Post-Traumatique (TSPT) [Rizzo *et al.*, 2015].

Dans le secteur de la santé, la RV est utilisée, depuis plusieurs années. Elle est utile pour divertir les patients en situation douloureuse. Elle sert par exemple à distraire un enfant pendant une piqûre ou soulager les grands brûlés [Malloy et Milling, 2010].

Elle possède également un potentiel thérapeutique car elle peut être utilisée pour aider les victimes de traumatismes à se remettre ou pour dompter certaines phobies [Patterson *et al.*, 2010].

La RV est également un outil de formation largement utilisé dans le secteur médical. Elle est exploitée dans la formation des étudiants en médecine et des chirurgiens. Elle se base sur la visualisation ou sur des simulateurs associant le sens de la vue et du toucher.

Falah propose par exemple un système en RV pour l'enseignement de l'anatomie [Falah *et al.*, 2014]. Les auteurs défendent ainsi, que la formation en RV permet de passer d'une expérience impliquant la mémorisation de la structure humaine sans réelle compréhension des relations entre les différents parties du corps humain, à une expérience

plus visuelle, plus compréhensible, plus efficace et moins gourmande en temps [Falah *et al.*, 2014].

Ahlberg démontre dans son étude l'efficacité de la RV pour la formation des résidents au cours de leurs premières cholécystectomies laparoscopiques [Ahlberg *et al.*, 2007]. En effet, il conclut dans son étude que le groupe de contrôle a commis trois fois plus d'erreurs que le groupe formé en RV.

Une étude portant sur la formation des neurochirurgiens montre ainsi que la RV permet de recréer des situations réalistes et qu'elle permet aux chirurgiens, confirmés ou novices, de s'évaluer et de se former à tout moment, sans avoir besoin de s'exercer sur des cadavres ou des patients [Bernardo, 2017].

Heng propose un simulateur pour la formation à la chirurgie arthroscopique du genou [Heng *et al.*, 2004]. Dans ce simulateur, l'utilisateur se voit présenter un système à retour de force réaliste, permettant de voir la déformation des tissus mous en temps réel. Le système permet également la découpe et la détection de collision pour plus de réalisme. Les données liées à la procédure sont enregistrées afin de créer des modules de formations.



(a) Formation en situation réelle



(b) Formation en RV

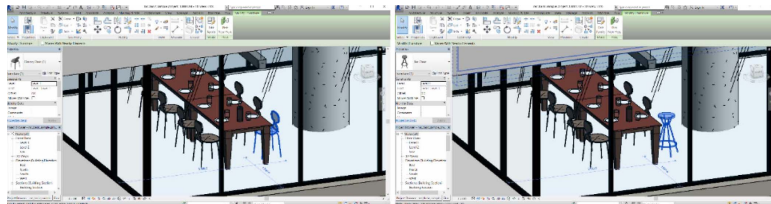
FIGURE 2.34: Formation des chirurgiens – Classique/RV

Kim confirme l'apport du retour de force dans la formation des chirurgiens [Kim *et al.*, 2004]. Bien qu'il pense que la formation en RV (simple immersion visuelle) permet d'acquérir une base solide, il stipule qu'un retour d'information tactile permet une meilleure compréhension des procédures d'une part, et une meilleure adaptation à des outils nécessitant précision et contrôle fin d'une autre part [Kim *et al.*, 2004].

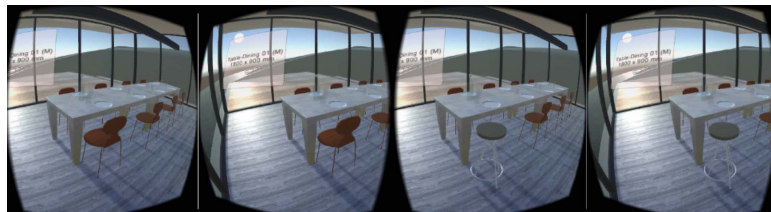
2.3.2 Cas d'usage dans la construction

L'utilisation de la RV dans la construction s'est répandue depuis l'adoption par le métier d'outils de modélisation 3D des bâtiments.

Le secteur a exprimé son intérêt pour la RV comme outil pour faciliter les processus de production [Du *et al.*, 2018]. Plusieurs expériences ont donc vu le jour. Au début, la RV est essentiellement utilisée par les ingénieurs pour la visualisation des maquettes des bâtiments, mais ne permet pas encore une communication dans les deux sens avec les outils de modélisations ni une bonne exploitation des données de la maquette [Whyte *et al.*, 2000]. Cela a changé avec le développement de plusieurs modules d'extension et logiciels permettant cette modification bijective (Fig. 2.35) [Du *et al.*, 2018].



(a) Visualisation de la maquette dans l'outil de modélisation Autodesk Revit



(b) Visualisation de la maquette en RV

FIGURE 2.35: Modification bijective entre les outils métiers et la RV

D'autres cas d'usage autour de la visualisation de la maquette voient le jour avec cette fois, l'implication du client ou de l'utilisateur final, pour faciliter la prise de décision et la revue de maquette [Petrova *et al.*, 2017]. La RV est également utilisée dans les écoles auprès des ingénieurs spécialisés dans la construction et ses différents métiers. Elle sert d'outil pour former à la prise de décisions importantes et à l'organisation de chantier en permettant aux étudiants de suivre, par exemple, l'évolution d'un projet dans le temps, et apprendre à gérer les aléas [Nikolic *et al.*, 2019]. Aussi, plusieurs industriels se tournent vers la formation sur les engins de chantier en RV (Fig. 2.36a) ainsi que les formations d'outils standards comme les échafaudages (Fig. 2.36b) [HaiyanXie *et al.*, 2006].

Plusieurs simulateurs sont nés, basés sur le modèle de jeux vidéo [Wang *et al.*, 2011]. Certains affichés sur écran et d'autres en casque de RV, ces simulateurs se basent sur des interfaces de commande réelles et des plateformes de mouvement pour plus d'immersion et de réalisme afin de retranscrire au mieux les sensations réelles [Patrão et Menezes, 2013; Zhonghua *et al.*, 2008]. Ce parallèle avec le monde du jeu vidéo permet de créer des scénarios d'opérations les plus courantes au moins habituelles, et ce à moindre coût.



(a) Formation engins de chantier [Source : www.acreos.eu]



(b) Formation sur les échafaudages [HaiyanXie *et al.*, 2006]

FIGURE 2.36: Exemples de formations en RV sur les outils de chantier

Le secteur s'est également intéressé à la RV et son apport à la formation et la sensibilisation aux risques du métier comme le risque électrique ou le travail en hauteur (Fig. 2.37). Hilfert propose par exemple un outil d'évaluation du comportement des com-



FIGURE 2.37: Prévention des risques liés au travail en hauteur en RV [Source : www.formations-journee-securite.fr]

pagnons travaillant à proximité d'engins de chantier, en les plongeant dans un EV créé à partir d'une maquette BIM. Cet outil permet ainsi d'analyser, évaluer et sensibiliser aux risques de la proximité engin-piéton [Hilfert *et al.*, 2016]. Zhao présente quant à lui une simulation de risque de choc électrique. L'auteur discute du potentiel de la RV et des EVs et leurs effets dans le conditionnement cognitif des ouvriers, faisant ainsi de ce genre d'expérimentation un outil intéressant pour la sensibilisation [Zhao *et al.*, 2009]. Dans son article, Subedi décrit une méthode d'analyse ergonomique combinant RV et suivi de posture. L'auteur se base sur des mesures et des captations vidéos d'ouvrier en bonne et mauvaise posture de levage et injecte les données dans un EV pour faire un retour personnalisé et sensibiliser ainsi aux risques de certaines tâches sur la santé [Subedi *et al.*, 2017].

Dans la suite, nous présenterons les travaux en RV de Bouygues Construction.

2.4 La réalité virtuelle chez Bouygues Construction

2.4.1 Les salles immersives de Bouygues Construction

Depuis 2015, Bouygues Construction a mis en place plusieurs projets de salles immersives. Ces salles sont prévues pour accueillir différentes technologies de RV pour qu'elles soient utilisées par différents profils, pour un usage ludique ou professionnel. Les usagers sont essentiellement des commerciaux ou des ingénieurs du BIM ou des méthodes. Cela sert à afficher différentes ambiances et aménagement d'un projet avant la construction réelle. Ainsi, il est possible d'anticiper différents choix et de prendre des décisions, parfois cruciales, lors de la phase de conception en se basant sur le Building Information Modeling (BIM).

La maquette BIM

Le BIM ou Building Information Modeling est avant tout une représentation d'un bâtiment ou d'un projet par une maquette en 3D. Les éléments qui constituent cette maquette ont leurs propriétés et paramètres propres [Martin, 2016]. Une porte par exemple sera représentée virtuellement mais contiendra également des informations sur ses dimensions et son matériau. Le BIM est ainsi une combinaison d'éléments que l'on peut visualiser ainsi que leurs caractéristiques. Il permet ainsi de concevoir virtuellement le bâtiment et facilite l'échange de connaissance et la communication entre les différentes parties prenantes du projet.

Le processus BIM a plusieurs avantages. Il permet de communiquer autour des projets et peut être utilisé comme support de marketing lors des réponses à appels d'offre. Les rendus 3D qui sont proposés sont également plus accessibles et plus compréhensibles qu'un plan 2D. Enfin, la représentation du bâtiment et de ses composantes à travers les témoins virtuels facilitent la communication et la projection de l'utilisateur dans son futur espace de logement ou de travail. Les salles immersives offrent des outils intéressants pour faciliter cette projection et accentuer le réalisme.

Ces salles ont également pour objectif de concentrer un certain nombre de technologies pour offrir une « extension de bureau » aux experts pour travailler sur les projets de construction, un démonstrateur de savoir-faire et d'innovation aux commerciaux et un moyen de vulgarisation scientifique aux différents collaborateurs, clients et visiteurs.

Le projet Callisto

Callisto–Sari est un projet soutenu par le Fonds Unique Interministériel (FUI) et mené par Bouygues Construction [Genty, 2015]. Ce projet est le fruit d’une collaboration entre huit partenaires : Immersion [Immersion, 2020], Art Graphique et Patrimoine [AGP, 2020], Universcience [Universcience, 2020], le Centre des Sciences et Techniques du Bâtiment [CSTB, 2020], Arts et Métiers ParisTech [ENSAM, 2020], École Centrale de Paris [ECP, 2020], le Laboratoire des usages en Technologies d’Information Numérique [LUT, 2020] et Bouygues Construction. Cette collaboration avait pour objectif de réfléchir aux problématiques de la RV pour la construction. Le but était de mettre en place une salle immersive accessible pour le grand public et les industriels pour la visite de projets de construction en RV. Ceci est dû à la nécessité d’utiliser la visualisation 3D efficacement ainsi que la sensibilisation de différents acteurs aux utilisations des modèles CAO 3D [Genty, 2015]. Les systèmes installés permettent ainsi :

- Une immersion dans un projet de construction,
- L’utilisation de la RV comme support pour la simulation lumineuse et acoustique d’un bâtiment,
- L’adaptabilité de l’interaction en fonction de l’utilisateur (Experts ou novice),
- La reproduction en RV de bâtiments patrimoniaux.

Ainsi, la salle permet de vivre une expérience immersive de visite de projet de bâtiment. L’utilisateur doit connaître les mêmes sensations que lors de la visite du projet réel. La salle se doit également d’être équipée pour que les différents experts travaillant sur le projet puissent interagir avec la maquette. Ainsi, plusieurs simulateurs sont disponibles afin de visualiser des grandeurs physiques tels que la température, la luminosité ou le rendu sonore du bâtiment. Enfin, au-delà de l’aspect technique, une validation architecturale est également possible. En conséquence, les personnes gravitant autour du projet (experts, client, occupant final. . .) peuvent équiper le projet de différents meubles, couleurs et de tester les différentes variantes de l’aménagement du lieu. L’impact de ces variantes sur les lumières et l’acoustique peut également être étudié.

Cela dit, la salle Callisto n’est pas uniquement destinée à des profils experts. Ces derniers ont besoin d’accéder à toutes les informations relatives au bâtiment. Le rendu architectural a moins d’importance que le rendu technique. Il peut ainsi utiliser les outils professionnels à disposition pour étudier cet aspect. La salle est également accessible à un public non averti. Ces profils peuvent ainsi visiter le projet et avoir une idée de son esthétisme et son agencement. La dernière population pour laquelle la salle est accessible est celle des scientifiques. Ces derniers peuvent analyser et étudier les différentes données extraites des différents simulateurs. Callisto répond ainsi à différents types de demandes

et s'adapte à plusieurs profils d'utilisateurs. Les systèmes qui y sont installés doivent donc s'ajuster à ces différents usages.

L'usage pour la construction

La salle Callisto est une salle immersive destinée à la promotion des projets de construction. Elle est équipée de différents matériels qui peuvent s'adapter à une utilisation par divers profils (experts du bâtiment, scientifiques, novices). Elle est ainsi équipée d'un écran hémisphérique de 11 m de largeur et 5 m de hauteur, sur lequel 8 projecteurs assurent l'affichage (Fig. 2.38).



FIGURE 2.38: L'écran hémisphérique de la salle Callisto avec les 8 projecteurs

En plus de la partie matérielle, la salle dispose d'une partie logicielle. Cette partie permet de proposer d'étudier toutes les possibilités de l'utilisation de la RV dans la revue de maquette BIM. Elle est composée de deux parties :

- Des logiciels de simulations techniques, orientés pour un usage par des experts ou des scientifiques,
- Des logiciels de visualisation, permettant une utilisation en mode « configurateur ».

Ainsi, la salle Callisto propose plusieurs usages pour la construction. En premier, la salle est équipée d'un simulateur de rendu lumineux. Il est possible de proposer des images avec des rendus réalistes des matériaux, pour une étude de design. La salle Callisto est également équipée d'un système de rendu sonore, capable de restituer l'environnement sonore réaliste d'un projet, en fonction des différents matériaux. Par exemple, il est possible d'étudier l'isolation phonique d'un projet et de se rendre compte de l'indice d'isolation de différents matériaux. Enfin, la salle Callisto permet de virtualiser des

projets pour la mise en lumière de projets patrimoniaux [Happe, 2011]. Par conséquent, il est possible de revoir l'architecture d'un bâtiment avant sa modernisation.

La première version de la salle Arcas

La salle Callisto est un projet mené par Bouygues Construction dans le but de fournir aux acteurs de la construction, aux scientifiques et au public, des outils de visualisation et d'analyse architecturale et technique des projets de constructions, à partir de la maquette BIM.

Dans cette même optique, Bouygues Construction a réfléchi à mettre en place une salle de RV accessible à ses collaborateurs, au siège, Challenger, à Guyancourt. De là est née la première version de la salle Arcas. Elle a été pensée pour répondre aux besoins des collaborateurs, techniciens ou non, et aux contraintes liées à l'utilisation de la maquette BIM. La salle Arcas est donc une salle de RV dédiée aux usagers du BIM et proposant des moyens de visualisation innovants. Elle est également accessible pour des visites d'universitaires, des industriels ou des clients potentiels, afin de montrer les avancées de Bouygues Construction en matière de RV et BIM. Ainsi, la salle doit pouvoir répondre à ces différents profils. Lors de la réception d'un client, il faut pouvoir présenter le projet et le mettre en avant. On peut donc se concentrer sur différents aspects comme le rendu architectural, l'agencement et l'adaptabilité à l'utilisateur ou encore l'intégration dans l'environnement urbain. Pour une présentation au public, la salle doit jouer le rôle de vitrine en proposant un aperçu du savoir-faire du groupe. Enfin, la salle doit également être un véritable couteau suisse pour une utilisation tournée vers le BIM. Elle doit donc accompagner les phases de conception et d'inspection de la maquette par les différents corps de métiers attachés à un projet de construction.

Pour cela, la salle Arcas a été équipée de plusieurs systèmes pour répondre à ces différents usages. Tous ces systèmes se lancent grâce à une tablette reliée au Wi-Fi et qui commande tous les équipements.

Le Cave est le système le plus imposant de la salle. C'est un écran incurvé de 6 m de largeur pour 2,5 m de hauteur avec un rayon de courbure de 2,43 m (Fig. 2.39). Cela permet d'augmenter l'effet d'immersion. Cette immersion est accrue par la présence de plusieurs enceintes autour de l'écran, qui gèrent l'ambiance sonore. L'écran est accompagné de deux projecteurs de haute définition pour un total de 24 000 lm (lumen). Chaque projecteur s'occupe d'une partie de l'écran pour recouvrir son intégralité. Chaque projecteur est capable de produire une image stéréoscopique. Ce système répond aux besoins des collaborateurs en matière de revue de maquette. Il intègre un système

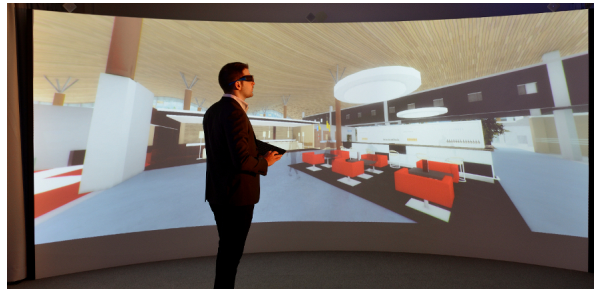


FIGURE 2.39: Le Cave – écran incurvé – de la salle Arcas

de clavier-souris pour l'interaction et d'un port USB pour l'importation des modèles. Le cave permet également aux ingénieurs de collaborer sur la même maquette BIM, en utilisant le même support de visualisation. Les éléments qui y sont affichés sont à l'échelle 1, c'est-à-dire que les objets ont leurs dimensions réelles. Ils peuvent ainsi retrouver leur environnement de travail et leurs outils de conception et peuvent facilement travailler dessus avec un niveau de précision supérieur à celui fourni par un écran d'ordinateur classique. Ceci permet ainsi de travailler sur la maquette BIM, de visualiser les différents espaces et volumes des projets, de se rendre compte de l'esthétisme du projet, d'interagir avec les éléments du projet (comme ouvrir les portes, déplacer le mobilier, changer les textures...) ou suivre l'avancement d'un chantier.

Le mur d'écrans haute définition Les ingénieurs dans les entreprises de construction sont encore obligés d'imprimer des plans 2D. Les écrans d'ordinateurs n'ont pas une assez bonne résolution pour rendre fidèlement les dimensions. Avec ce mur d'écran composé de quatre télévisions positionnées en carré, la résolution d'image est de 3840 px × 2160 px (Fig. 2.40).



FIGURE 2.40: Le mur d'écran avec les quatre télévisions pour une résolution de 3840 px × 2160 px

Ainsi, il est possible d'afficher des plans sur une surface d'affichage importante d'une diagonale de 280 cm.

Cet écran sert également à afficher du contenu plus esthétique à des fins commerciales. Une des applications proposées est la visite d'une chambre d'hôtel de luxe à Cuba, avec la possibilité de changer les textures et les lumières pour se rendre compte des différentes configurations possibles.

Casques immersifs La salle Arcas a pour objectif, entre autres, de mettre à disposition des ingénieurs de la construction des outils de visualisation de meilleures résolutions que les outils dont ils disposent. En plus du mur d'écran et du cave, la salle Arcas dispose également d'un coin RV. Dans un premier temps, la salle a bénéficié du casque Oculus Rift DK 2 (Fig. 2.41a). Cela permettait ainsi de visualiser une maquette ou un projet à 360°. Mais cela se limitait à cela. Aucune interaction n'était possible et le déplacement se faisait grâce à une manette. Avec les évolutions qu'a connu l'univers de la RV, la salle Arcas a été équipée d'un autre casque de RV, le HTC Vive (Fig. 2.41b). Ce casque permet de se déplacer dans un espace de jeu en marchant, offrant ainsi plus de possibilités d'interaction avec la maquette, comme le changement de matériaux ou de mobiliers.



(a) Le casque de RV Oculus Rift DK 2



(b) Le casque de RV HTC Vive et ses équipements

FIGURE 2.41: Les casques de réalité virtuelle utilisés dans la salle Arcas

L'usage pour la construction

La salle Arcas est équipée pour répondre aux besoins des ingénieurs de la construction. Elle permet d'offrir un environnement complet de travail pour tous les profils du groupe. Ainsi, les formateurs peuvent s'en servir pour des formations métiers ou de sensibilisation aux risques, en utilisant les supports de visualisation ou, dernièrement, le casque de RV. Elle permet également de projeter du contenu qualitatif pour montrer le savoir-faire du groupe et communiquer sur des projets phares.

Avec l'apparition de nouvelles technologies et de nouveaux cas d'usages, Bouygues Construction fait évoluer la salle pour en faire une salle d'exposition accessibles aux collaborateurs en interne comme aux clients.

La deuxième version de la salle Arcas

Il a été décidé de rénover la salle Arcas afin de répondre à d'autres objectifs que ceux fixés auparavant. La salle sera opérationnelle à la fin de l'année 2020. L'évolution des technologies mais également des besoins a poussé Bouygues Construction à entreprendre cette rénovation. Ainsi, la nouvelle salle Arcas a pour ambition d'être un laboratoire des technologies de réalité virtuelle et réalité augmentée (RV et RA). La RA est une technologie qui permet l'intégration en temps réel du contenu numérique avec l'information disponible dans le monde réel. Elle combine des objets réels et virtuels dans un environnement réel [Azuma, 1997].

L'objectif de ce laboratoire se décompose en quatre points :

1. Expérimenter des cas d'usage et en identifier la valeur ajoutée,
2. Proposer des offres en interne,
3. Conseiller les offres des prestataires externes,
4. Montrer les nouvelles technologies.

L'aménagement de la salle a été imaginé comme le montre la figure (Fig. 2.42). Il est composé de quatre zones :

1. Un espace d'accueil qui permet de communiquer sur les démonstrateurs disponibles ainsi qu'un présentoir avec les différents casques de RV,
2. Un espace régie qui permet de piloter les expérimentations,
3. Un espace d'observation pouvant accueillir les invités,
4. Un espace RV/RA pour la mise en pratique et les démonstrations.

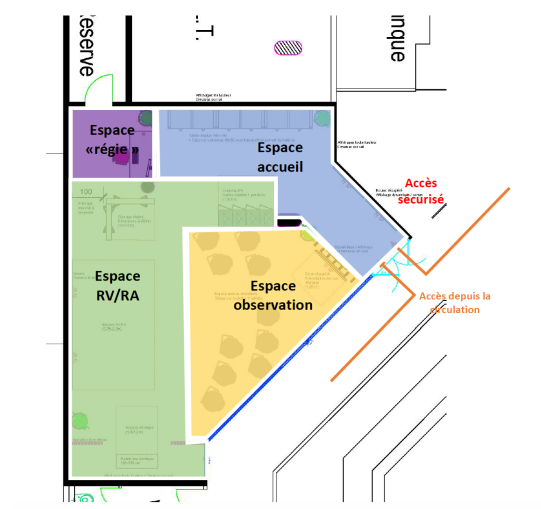


FIGURE 2.42: Aménagement de la deuxième version de la salle Arcas

Ces espaces permettent de définir six « parcours client ». Dans un premier temps, la salle permettra d'interagir avec les promoteurs, les architectes et le client final pour valider des options de finition et d'aménagement. Dans un deuxième temps, un système d'aide et de contrôle d'implantation des réservations et un assistant de traçage seront proposés. Ensuite, un atelier de formation des compagnons est proposé. De plus, il est prévu d'installer un système de contrôle de port des EPI au moment de l'accès sur zone de production. De plus, il sera possible de revoir les modes opératoires en RV et en RA et d'assister le collaborateur. Enfin, le contrôle de conformité sera automatisé via le traitement d'image et l'apprentissage machine.

La salle se veut donc polyvalente et répondant aux besoins et interrogations des collaborateurs internes en matière de technologies de RV, de RA et d'intelligence artificielle d'une part, et vitrine de Bouygues Construction en matière d'innovation pour les clients et les visiteurs en externe de l'autre.

Cette salle, en plus de regrouper des cas d'usage pertinents pour la construction, regroupera les derniers casques de RV afin de montrer aux collaborateurs les avantages et les limites de chaque technologie.

Les salles immersives ont l'avantage d'offrir un ensemble de technologies de RV intégrant de plus en plus les outils métiers et de faciliter la collaboration. Elles sont également un très bon moyen de sensibilisation aux nouvelles technologies et à la transition numériques des entreprises. Ces salles permettent ainsi d'utiliser différentes technologies immersives et proposent des contenus métiers déclinables sur plusieurs supports, notamment les casques de RV.

2.5 La réalité virtuelle pour les ingénieurs du BIM

La RV intéresse plusieurs disciplines. Elle se distingue par des coûts de plus en plus accessibles et des cas d'usage multiples, comme vu précédemment. Pour la construction, la réalité virtuelle peut être un atout considérable en phase de conception d'un bâtiment [Greenwood *et al.*, 2008]. Bouygues Construction utilise la RV depuis 2015. Elle est utilisée comme outil de communication et de conception [Martin, 2016]. Les ingénieurs de l'entreprise utilisent la RV pour :

- La validation techniques des installations,
- La validation architecturale.

Pour le premier point, la RV peut s'avérer très utile. Avec le remplacement des plans papiers 2D par les témoins virtuels en 3D, il est plus simple aux ingénieurs de détecter rapidement les problèmes liés à la maquette. Il est possible de vérifier que les installations prévues répondent aux contraintes des différents corps de métier. Mais l'intérêt de la RV ne s'arrête pas là. Il est possible de valider les choix techniques avec les utilisateurs finaux. Prenons le cas d'un hôpital par exemple, il est possible de projeter le futur bloc opératoire dans la RV et faire une visite virtuelle avec les chirurgiens et les infirmiers. Le corps médical est immergé dans la future salle à l'échelle 1, et peuvent partager leurs contraintes concernant l'emplacement des prises électriques par exemple. Les ingénieurs peuvent facilement intégrer les remarques des médecins, en temps réel, et valider techniquement les choix des installations.

Pour le deuxième point, il s'agit ici de valider l'esthétique du projet. Cela permet aux architectes d'avoir un meilleur visuel du rendu de leur projet (Fig. 2.43). Cela permet également au client final, bailleur ou occupant, de se projeter dans son futur logement. Il est possible ainsi de valider des configurations d'agencement, des matériaux, les lumières, entre autres.



FIGURE 2.43: La réalité virtuelle pour la visite d'appartement

Cela permet également de se rendre compte, de façon plus macroscopique, de l'intégration d'un bâtiment dans son milieu. Il est ainsi possible de se rendre compte de son implantation dans un quartier.

Récemment, Bouygues Construction utilise la RV pour mettre en valeur le processus du BIM 4D ; la maquette numérique avec une fonction de temps, permettant de voir toutes les phases de construction d'un bâtiment et le suivi de chantier, à échelle réelle. Cela permet d'anticiper d'éventuels problèmes mais également de communiquer, plus visuellement et sans être sur chantier, avec les clients.

La RV a fait ses preuves dans d'autres industries comme outil de formation. Dans la construction, il existe plusieurs applications et cas d'usage de RV dédiée à la formation. On retrouve l'exemple des simulateurs de formation au poste de travail [Saint-Gobain et Clarte, 2012] ou de formation à la sécurité [Sacks *et al.*, 2013].

Chez Bouygues Construction, il existe également des applications de RV pour les compagnons. Il existe des applications de sensibilisation aux risques et des formations au poste de travail.

2.6 La réalité virtuelle pour la sensibilisation aux risques sur chantier

La RV est une technologie qui permet de reproduire grâce à un ordinateur n'importe quel environnement, réel ou imaginaire. C'est également un outil de formation utilisé par plusieurs industries de par la simplicité de mise en place et les coûts réduits de production.

Chez Bouygues Construction, la RV est utilisée sur les chantiers pour la sensibilisation aux risques. L'immersion que promet la RV permet ce genre d'applications et offre à l'utilisateur une prise de conscience des risques en environnement contrôlé. Ainsi, dans la cadre de la « Journée mondiale Santé/Sécurité » tenue annuellement par le groupe, nous avons développé une application regroupant quatre cas d'usage inspirés des règles fondamentales de la sécurité du groupe :

- La chasse aux risques,
- Le travail en hauteur,
- La consommation d'alcool,
- Risques électriques,
- La circulation sur chantier.

Le contenu de ces applications est détaillé dans la suite.

2.6.1 La chasse aux risques

Cette application a été inspirée par celle développée sur tablette par Bouygues Construction. Nous avons constaté lors du déploiement de la première version (sur tablette), que peu de compagnons étaient à l'aise avec l'outil. Ils ne savaient pas s'en servir. Pour la plupart, ils ne l'utilisaient pas au quotidien. Nous avons décidé d'adapter le contenu sur un casque de RV (HTC Vive).

Le compagnon se trouve sur un chantier. Il a une manette munie d'un laser virtuel. Il doit se déplacer sur le chantier virtuel (en se téléportant) et se rendre aux différents points signalés. Il doit ensuite observer son environnement autour de ce point d'intérêt et détecter le risque. Il doit viser avec son laser et cliquer. Apparaît alors trois propositions de corrections, il doit en déterminer la bonne ou la meilleure, quand il y a plusieurs possibilités.

2.6.2 Le travail en hauteur

Dans le BTP, la chute de hauteur est une des causes principales d'accidentologie grave et létale [OPPBTB, 2019a]. Il existe des formations pour obtenir l'habilitation à travailler en hauteur.

Dans l'application que nous avons développée, nous avons souhaité explorer le potentiel de la RV. L'objectif était de pouvoir faire vivre à l'utilisateur une expérience de chute sans que cela n'impacte son état physique. Ainsi, le compagnon se retrouve sur le toit d'un immeuble en construction. Il a pour consigne de monter sur la passerelle d'une banche et d'aller élinguer l'une d'elle pour qu'elle soit emportée par la grue. L'arrivée du compagnon sur la banche concernée enclenche l'animation de la grue. Le compagnon se retrouve sans garde corps, il a deux choix : relever le garde corps ou faire valoir son droit de retrait. Sans cela, la chute est assurée (Fig. 2.44).



FIGURE 2.44: Application de travail en hauteur développée par Bouygues Construction

Nous avons fait tester cette application à plusieurs collaborateurs dans l'entreprise ; compagnons et responsables santé et sécurité. Ils ont tous été surpris par la capacité de la RV à tromper le cerveau et lui donner la sensation qu'il est actuellement face au vide. Pour les compagnons, habitués à travailler en hauteur, leur ressenti dans l'EV était plus marquant que dans la réalité. En effet, d'après eux, ils sont concentrés sur leurs tâches quand ils sont sur chantier et s'efforcent de ne pas penser aux risques. Le fait de se

trouver dans un EV, en hauteur, était pour eux très impressionnant, plus que dans la réalité.

2.6.3 La consommation d'alcool et de drogues

La consommation de boissons alcoolisées et de substances illicites peut représenter un risque sur la sécurité et la santé des compagnons. Chez Bouygues Construction, la consommation d'alcool et de drogues est interdites sur les chantiers, comme dans les bureaux.

Nous avons développé un module de RV de consommation d'alcool. Nous avons fait le choix de choisir une tâche très simple, mais qui demande beaucoup de précision : empiler des cubes. Dans l'exercice, le compagnon se retrouve devant une table et devant lui, des cubes qu'il doit superposer pour former une tour. Nous commençons par un taux d'alcoolémie virtuel à zéro que nous pouvons progressivement augmenter. Cela crée un flou au niveau des écrans de la caméra, un champs de vision réduit et un léger effet de tangage (Fig. 2.45). Aucune personne, compagnon ou responsable prévention, n'a pu

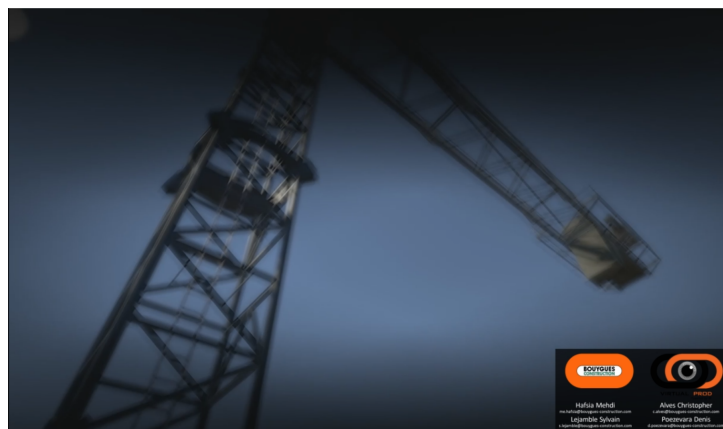


FIGURE 2.45: Application « drogues et alcool » développée par Bouygues Construction

réussir l'exercice. L'objectif de ce module est d'expliquer que sur une tâche aussi basique que prendre des cubes et les poser, cela peut s'avérer compliqué dès lors que nos sens sont perturbés par une consommation d'alcool. Sur chantier, il ne s'agit pas d'empiler des cubes, mais de manipuler des objets lourds et de l'électroportatif. Consommer de l'alcool ou des substances illicites peut avoir des conséquences graves sur le compagnon.

Cette application nous a surtout prouvé que la gamification des formations était intéressante. En effet, nous avons remarqué qu'il s'est installé une sorte de compétition auprès des collaborateurs, voulant faire « mieux que le collègue d'avant ». Ceci rejoint bien le principe du serious game.

2.6.4 Risque électriques

Les accidents de travail d'origine électrique dans le BTP sont plus faibles que les autres accidents de travail mais sont souvent plus graves [OPPBTP, 2019b].

Dans ce module, nous avons concentré un certain nombre de règles de sécurité. Ainsi, le compagnon se retrouve dans un bungalow de chantier et doit s'équiper avant de sortir. S'il sort sans ses EPI, il risque l'accident. Une fois équipé, la consigne est de régler un problème électrique. En se déplaçant sur le chantier, il doit faire attention car il risque de se faire écraser par un camion. Enfin, une fois devant le panneau, il doit tout simplement le refermer car il n'est pas habilité, sinon il risque l'électrocution.

Ce module a peu suscité l'intérêt des compagnons. En effet, ils reprochent à la simulation le manque de réalisme car ils ne ressentent pas les effets physiques du choc d'une part, et le fait qu'ils soient tous au fait qu'ils ne peuvent pas manipuler des sources électriques sans être habilités d'autre part.

2.6.5 La circulation sur chantier

Une grande partie de la préparation d'un chantier consiste en son organisation. Un chantier est un environnement dynamique. Le service de prévention doit être en mesure d'anticiper les risques liés aux situations de co-activité, responsables de plusieurs accidents.

Nous avons développé un module de circulation sur la base technique matérielle de Bouygues Construction. Le compagnon a pour consigne d'amener des plans à un collègue qui se retrouve à endroit de la base. Il doit pour cela suivre les passages indiqués pour la circulation piétonne. Il doit faire attention aux camions qui passent. A un moment, il est confronté à deux choix : prendre le chemin le plus long en respectant les chemins prévus ou prendre un raccourci et se retrouver dans le périmètre de travail de la grue. S'il choisit la première option, l'exercice se termine bien. S'il choisit la deuxième option, il se retrouve directement sous une charge transportée par la grue. Dès qu'il lève la tête pour la regarder, l'animation de la chute s'enclenche et il se retrouve coincé sous un tas de ferrailles. L'objectif de cet exercice est d'expliquer au compagnon qu'il faut toujours respecter les chemins de circulation prévus pour les piétons.

Nous avons fait tester cette application à des compagnons. Nous avons été surpris de voir leurs réactions. Entre se couvrir le tête pour se protéger ou courir pour tenter d'échapper à la charge, la sensation d'un objet qui leur arrive dessus les a impressionné. Les responsables prévention pensent que c'est un bon moyen de limiter les accidents dus au non respect des règles de circulation sur chantier.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la RV et les différents cas d’usage. La RV permet ainsi, grâce aux salles immersives ou aux casques de RV, de travailler, communiquer et partager les connaissances autour d’un projet.

Pour la construction, l’utilisation de la RV répond à plusieurs profils qui ont des besoins différents (Fig. 2.46).

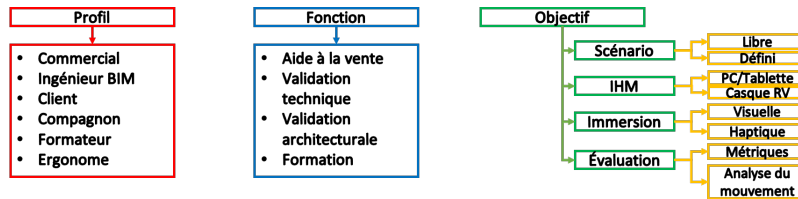


FIGURE 2.46: Les modalités d’interaction en fonction des profils et des objectifs dans la construction

Nous avons listé un certain nombre d’utilisateurs potentiels de la RV avec les fonctionnalités attendues. Les objectifs établis doivent répondre à un certain nombre de critères comme les scénarios d’utilisation, l’interface d’interaction Homme–Machine, le type d’immersion et les modalités d’évaluation.

Pour un commercial, la RV est utilisée comme support de vente (Fig. 2.47).

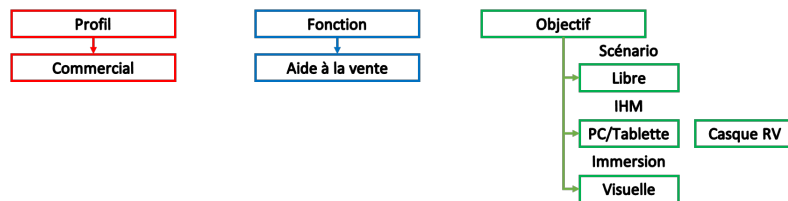


FIGURE 2.47: Instance du modèle d’utilisation de la réalité virtuelle – Profil commercial

L’expérience RV qui découle de ce besoin peut être proposée sous un format de simple visite, sans planification ni scénarisation. Elle peut être proposée sous forme de visite sur un ordinateur ou une tablette ou en utilisant un casque de RV, pour une visite plus immersive. L’immersion n’est donc que visuelle et ne nécessite pas d’autres modalités d’interaction.

La RV peut être utilisée par les ingénieurs BIM pour une validation technique du projet de construction (Fig. 2.48).

L’ingénieur peut ainsi prévoir une visite complète du projet ou définir un parcours préalable pour valider des choix techniques d’installation, sur un support simple comme

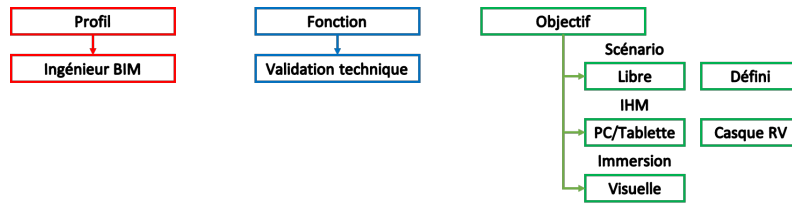


FIGURE 2.48: Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil ingénieur BIM

un ordinateur ou un casque de RV qui offre une visualisation à l'échelle réelle du projet. L'interaction est également limitée à la visualisation et une interaction limitée à la souris ou à des manettes.

Le troisième profil identifié est le client. La notion de « client » est double : il y a d'un côté l'investisseur (bailleur social, client privé, l'état...) et de l'autre, l'utilisateur final du bâtiment. Pour le premier, il s'agit de valider des choix architecturaux (façades, décorations, agencement...) (Fig. 2.49). Pour le deuxième, au-delà de la validation architecturale, l'objectif peut être également de valider, avec les ingénieurs BIM, des installations techniques. Nous pouvons prendre le cas d'un corps médical qui valide les installations électriques dans la salle d'opération d'un projet d'hôpital. L'utilisateur final, conscient de ses contraintes, peut accompagner les ingénieurs dans la conception du bâtiment.

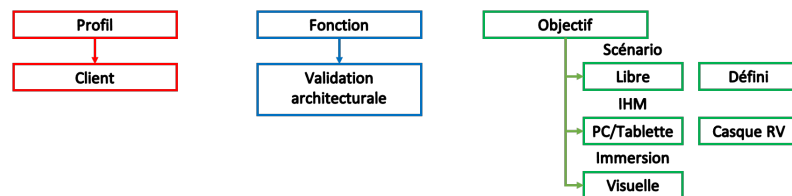


FIGURE 2.49: Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil Client

Dans les deux cas, l'expérience RV peut porter sur l'ensemble du projet ou sur des points spécifiques (validation des matériaux, façades...). L'interaction peut se faire, de la même manière que précédemment, sur des supports de type ordinateur ou casque de RV, et l'immersion est également visuelle.

La RV est utilisée depuis quelques années par Bouygues Construction pour la formation et la sensibilisation des collaborateurs sur chantiers aux risques liés à leurs métiers. Plusieurs cas d'usage ont été développés, axés sur les règles de sécurité établies par le groupe. Dans les différents cas d'usage développés, plusieurs secteurs utilisent la RV pour la formation au poste de travail. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à

un outil fréquemment utilisé sur le chantier, la banche. Coffreur–bancheur est un métier et une expertise en soit. Il est le seul capable de bien piloter la mise en œuvre de la banche, d’assurer le bon déroulement de la procédure, et d’intervenir en cas d’opérations complexes. Mais cette tâche nécessite une formation longue, et il existe des risques.

La formation implique également un formateur et l’ergonome.

Le formateur a besoin de retour sur l’action des compagnons (Fig. 2.50). Il a besoin de métriques afin de pouvoir mieux accompagner ses stagiaires lors des formations. Son rôle est d’assurer la bonne compréhension et la maîtrise du compagnon des procédures, des tâches et des routines liés à son poste de travail. Aujourd’hui, il n’existe pas d’outil qui lui permettent de le faire. Indépendamment des outils de RV, il a besoin d’un retour d’informations lié à l’exécution des tâches.

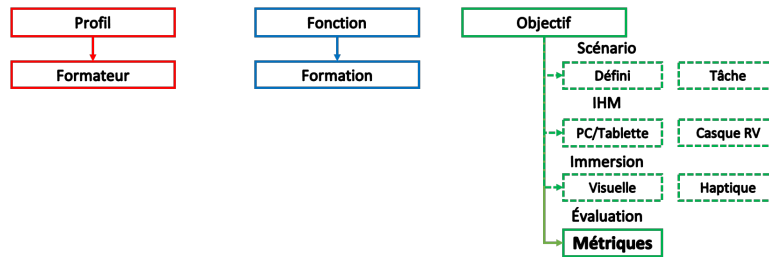


FIGURE 2.50: Instance du modèle d’utilisation de la réalité virtuelle – Profil Formateur

L’ergonome quant à lui a pour rôle de s’assurer que l’exécution des tâches se fait de telle manière à ne pas mettre en danger la vie et la santé du compagnon (Fig. 2.51).

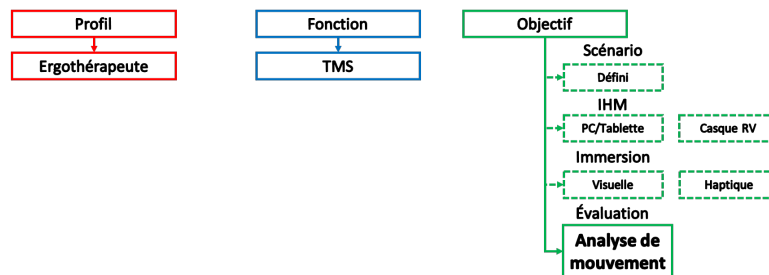


FIGURE 2.51: Instance du modèle d’utilisation de la réalité virtuelle – Profil Ergonome

Il a besoin de suivre le mouvement du compagnon lors de l’accomplissement de sa tâche afin de le conseiller et l’accompagner dans la maîtrise du geste et la compréhension des risques immédiats et différés. L’utilisation de la RV visuelle, sur un ordinateur, une tablette ou un casque de RV, peut s’avérer incomplète et inadapté à l’analyse du mouvement, en l’absence d’un retour haptique.

Pour le compagnon, le constat est le même (Fig.2.52). L’absence de retour haptique dénature la tâche et fait perdre la formation en efficacité.

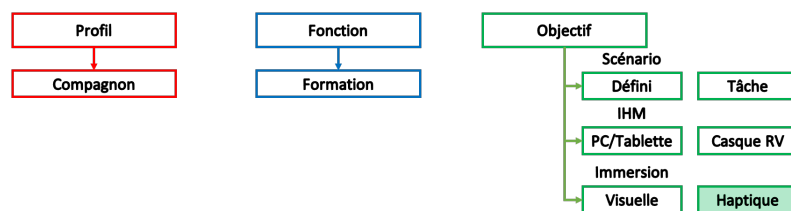


FIGURE 2.52: Instance du modèle d'utilisation de la réalité virtuelle – Profil Compagnon

Nous pouvons nous baser sur une projection d'un scénario défini (une ou un ensemble de tâche(s)), sur un ordinateur, une tablette ou un casque de RV. Cela dit, il faut associer à l'immersion visuelle, une immersion haptique.

La question qu'on peut poser est donc : comment spécifier une plateforme pour la formation des compagnons aux bons gestes lors de la mise en œuvre de la branche et qui répondrait aux besoins du formateur (en matière de métriques) et de l'ergonome (en matière de suivi du mouvement) ?

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art de la RV. Nous avons présenté les cas d'usage dans les différentes industries. Dans la construction, la RV est utilisée pour la visualisation des maquettes et depuis quelques années, dans la formation. L'utilisation de la RV en formation peut répondre aux besoins de différents profils identifiés : le formateur, l'ergonome et le compagnon. La RV apporte une immersion et un aspect ludique aux formations. La RV ne répond cela dit pas à un besoin de la formation : l'évaluation des risques de TMS lors de l'accomplissement de tâches.

L'intérêt des simulateurs haptiques a été également discuté. Ils permettent de renforcer l'engagement et ajouter une dimension réaliste à une expérience en RV. Il serait intéressant d'observer son apport pour la formation aux bons gestes et à la bonne posture dans la construction.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la banche. Nous décrirons les risques qui sont associés à son utilisation et les moyens mis en place par l'entreprise pour répondre à ces enjeux de sécurité. Nous présenterons également l'application développée en RV autour d'une des étapes de mise en œuvre de la banche, la stabilisation.

Chapitre 3

La réalité virtuelle dans la prévention des risques dans la construction – Cas d’usage de la banche

Sommaire

3.1	Présentation de la banche	72
3.2	Étapes, procédures et risques liés à l’utilisation de la banche	73
3.2.1	La préparation des panneaux	73
3.2.2	Le décoffrage des panneaux	74
3.2.3	Le ferrailage	75
3.2.4	La mise en place des panneaux – le coffrage	75
3.2.5	Le coulage du béton	76
3.2.6	Le nettoyage des panneaux	77
3.3	Banche et formation	78
3.4	Spécification de la formation au poste de travail de banche en réalité virtuelle	80
3.5	Évaluation d’une application en réalité virtuelle en version visuelle	81
3.5.1	Première application développée en réalité virtuelle	82
3.5.2	Évaluation de l’application développée	83

La formation est un bon moyen de sensibiliser les compagnons aux risques liés à leurs métiers. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la formation des compagnons à un outil spécifique mais largement utilisé dans le BTP : La banche. L’utilisation de la banche représente de nombreux risques sur la sécurité et la santé du compagnon. L’un des risques les plus présents est la survenue des TMS.

Dans ce chapitre, nous introduirons la banche, nous présenterons les différents risques liés à son utilisation, nous ferons un état des lieux des formations actuelles et finirons par l’approche que nous proposons. L’objectif est de définir les besoins en spécifiant pour une plateforme dédiée à la formation aux gestes d’un bancheur

3.1 Présentation de la banche

Un coffrage (Fig. 3.1) est défini comme un système d’enveloppe temporaire utilisé dans le secteur de la construction comme moule dans lequel le béton est coulé à la forme et à la taille désirées [López-Arquillos *et al.*, 2014]. Un coffrage est composé de deux



FIGURE 3.1: Banche B07 [Outinord, 2020]

panneaux. Il est composé de plusieurs parties et accessoires tels que des béquilles, des vérins, etc. . . Il est important que les compagnons puissent identifier et reconnaître ces éléments afin d’assurer la progression du montage, de la mise en place, de l’utilisation et du démontage. De plus, le coffrage est lourd. Il pèse environ $225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, soit un peu plus de 1 t (tonne) pour un panneau standard de 1,2 m de largeur par 2,85 m de hauteur. D’après les experts consultés, la banche est un élément essentiel dans la construction. Il permet de former des murs rapidement, sur de grandes hauteurs. D’après ces mêmes experts, un bancheur est un spécialiste de la banche. Il est le seul à posséder les acquis théoriques et pratiques pour veiller à la bonne mise en œuvre de la banche sur un chantier. Lors des coulages de voiles, les équipes de compagnons comprennent au minimum un compagnon bancheur pour veiller au bon déroulement de l’opération. Il est capable d’intervenir sur les phases délicates et d’apporter son expertise pour le placement des panneaux, entre autres.

Cela dit, son utilisation représente un risque sur la santé et la sécurité des compagnons.

3.2 Étapes, procédures et risques liés à l'utilisation de la banche

Une banche est un coffrage outil répandu sur les chantiers du BTP. Servant de moule provisoire dans lequel le béton est coulé, elle est indispensable pour les élévations de voiles en béton.

La banche, par conception, fait partie des outils les plus à risques sur un chantier. Huang et Hinze ont observé que 5,83% des accidents se produisaient lors de la manipulation du coffrage en hauteur [Huang et Hinze, 2003]. Hallowel et Gambatese ont souligné que 21,2% des collisions ont également été provoquées par le coffrage [Hallowell et Gambatese, 2009].

La mise en œuvre de la banche se fait en six grandes étapes. Chacune de ces étapes est un mélange d'exigences telles que, entre autres :

- Les contraintes posturales comme avoir le bras au-delà de l'horizontale, la tête en hyper extension ou être accroupi,
- Les manutentions manuelles supérieur à 15 kg,
- Les gestes répétitifs au niveau des épaules ou des bras,
- Les efforts soutenus (lever, pousser, riper).

Ces six étapes sont listées dans la suite en présentant les risques associés et donc les besoins en formation.

3.2.1 La préparation des panneaux

Le chef d'équipe transmet le plan de phasage de la journée aux compagnons. Il permet de communiquer l'ordonnancement des voiles qui seront coulés dans la journée. Ainsi, le compagnon sait sur quelle banche il doit intervenir. La préparation du panneau est donc primordiale. Elle permet de limiter les sollicitations pendant la journée de travail.

Cette phase comporte un certain nombre d'étapes qui représentent plusieurs risques. En effet, pour la préparation, les compagnons sont amenés à amener les matériels nécessaires, et sont donc exposés à des risques de manutention manuelles. Lors de l'utilisation du matériel, ils peuvent ainsi se retrouver dans des postures inadéquates. Le compagnon est également amené à utiliser de l'outillage électroportatif. Cela l'expose ainsi à se retrouver dans des positions accroupies ou en torsion. Il est également exposé aux poussières et aux vibrations.

3.2.2 Le décoffrage des panneaux

Le décoffrage des voiles est la première étape de la journée du compagnon coffreur-bancheur. Il commence ainsi par desserrer, retirer et stocker les tiges hautes et basses, les barrettes et desserrer les béquilles. Les élingues sont accrochées et la banche est ensuite décollée à la barre à mine pour limiter les adhérences du panneau de banche sur le béton coulé la veille et permettre à la grue de lever la banche plus facilement. Les étapes suivantes sont le décoffrage des mannequins et des réservations, le désaccouplement des panneaux et le retrait des baguettes de joints et des aimants. Le compagnon procède enfin au contrôle de l’ouvrage (Fig. 3.2).

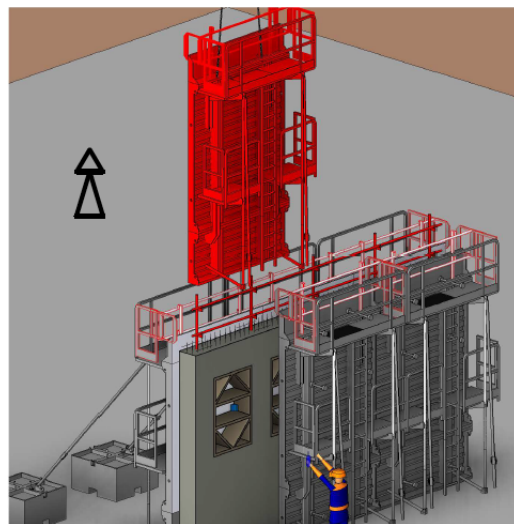


FIGURE 3.2: Décoffrage et désaccouplement des panneaux

Les exigences liées au décoffrage sont multiples. En effet, le desserrage des tiges est extrêmement contraignant. La tâche exige un grand effort et les compagnons ont tendance à monter sur les clés, pouvant être coincées dû à la pression du béton, pour enclencher le desserrage. Aussi, la posture du compagnon est mise à rude épreuve. Il se retrouve avec les bras au-delà de l’horizontal, en torsion et la tête en hyper extension lors du retrait des tiges hautes et le tronc courbé en avant et accroupi lors du retrait des tiges basses. Lors du décoffrage des réservations, il est amené à être à genoux mais également en torsion ou encore les bras au-delà de l’horizontal. Le compagnon est également sujet aux percussions lors de cette phase, en utilisant le marteau. Cela est le cas lors du retrait des cales, de l’about ou des baguettes de joints, entre autres. En matière d’ambiance physique, lors du décoffrage des réservations, des poussières silice peuvent se retrouver dans l’air. Le compagnon est également sujet au bruit (d’un niveau supérieur à 80 dB, lors de l’utilisation du marteau) lors des retrait des cales ou du décoffrage des mannequins. Les gestes répétitifs et les efforts soutenus sont également des risques lors de cette phase. Le desserrage des tiges, le retrait des cales et des barrettes et le

décoffrage des réservations font partie des étapes qui comportent ces risques.

3.2.3 Le ferrailage

Une fois le panneau de banche installé (Fig. 3.3), et avant le coulage du béton, le compagnon procède au ferrailage. Il commence ainsi par placer et déplier les stabox. Ensuite, il réplique les aciers en attente, réalise le ferrailage et le met en place avec les rondelles (Fig. 3.3).

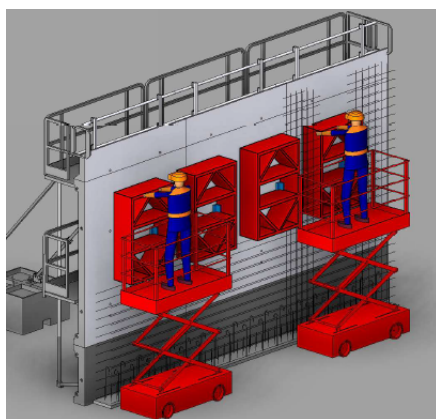


FIGURE 3.3: Ferrailage

Toutes ces étapes sont contraignantes pour le compagnon. Il jongle, en effet, entre la position accroupie, à genoux ou encore en torsion lors de la mise en place des stabox ou du ferrailage et sa réalisation. Il est également exposé aux vibrations lors de l'utilisation de marteau ou d'électroportatif. Le compagnon est amené à répéter un certain nombre de gestes lors, notamment, de la réalisation ou la mise en place du ferrailage. Tous les membres supérieurs sont sollicités lors de l'accomplissement de ces tâches.

3.2.4 La mise en place des panneaux – le coffrage

Cette phase représente certainement la phase la plus longue de la procédure de mise en œuvre de la banche. Lors de cette phase, le compagnon réceptionne la banche amenée par le grutier. Il met en place les panneaux, place les lests et met en place les étais tirant-poussant. Les panneaux sont ensuite accouplés et alignés à la barre à mine. Le compagnon met ensuite en place la PIRL (plateforme individuelle roulante légère), nettoie et huile la peau coffrante. Les réservations sont ensuite réalisées et posées. Les serre-joints, les tiges, les cônes, les écarteurs et les mannequins sont ensuite mis en place. Il ferme ensuite les banches et les ajuste à la barre à mine. Il finit par serrer les tiges hautes et basses, mettre en place les barrettes d'abouts et contrôler le coffrage (Fig. 3.4).

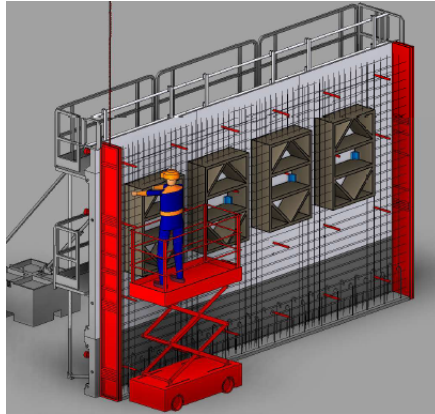


FIGURE 3.4: Mise en place des abouts et des tiges

Lors de la mise en œuvre de la banche, le compagnon est soumis à un certain nombre de contraintes. En effet, lors de la mise en place des panneaux ou des lests, lors de la pose des réservations ou le huilage de la peau coffrante, le compagnon se retrouve avec les bras en l’air et la tête en hyper extension. Lors de la réalisation des réservations, le coffrage des angles et le placement du bouchon du trou d’entretoise, entre autres, il se retrouve très souvent accroupi ou à genoux. Lors de la mise en place des abouts, le serrage des tiges ou encore l’ajustement à la barre à mine, il est également en position contrainte, en torsion et le tronc en avant.

Il est également exposé aux postures contraignantes, aux vibrations, au bruit et aux poussières lors de la réalisation des talonnettes ou des réservations.

Le compagnon répète également très souvent certains gestes comme lors de l’accouplement des panneaux, le coffrage des angles ou encore la mise en place des mannequins. L’utilisation de la barre à mine pour la fermeture ou l’alignement, la mise en place de l’arrêt de coulage, des tiges et des barrettes d’abouts exigent un effort soutenu.

3.2.5 Le coulage du béton

Une fois les banches alignées et le ferrailage mis en place, le béton est prêt à être coulé. Le compagnon monte sur la passerelle, place la chaussette dans le voile et la tient, amène le vibreur sur la passerelle et vibre le béton. Il nivelle ensuite à la règle et met en place les aciers en tête de voile. La pompe est ensuite amenée et insérée pour couler le béton (Fig. 3.5).

Lors du coulage, le compagnon est exposé à un certain nombre de risques. En effet, il est exposé aux risques chimiques dus aux projections de béton frais. Le vibreur quant à lui représente une source de nuisances sonores. Les contraintes posturales sont également multiples. Le compagnon se retrouve ainsi les bras au-delà de l’horizontal lors du

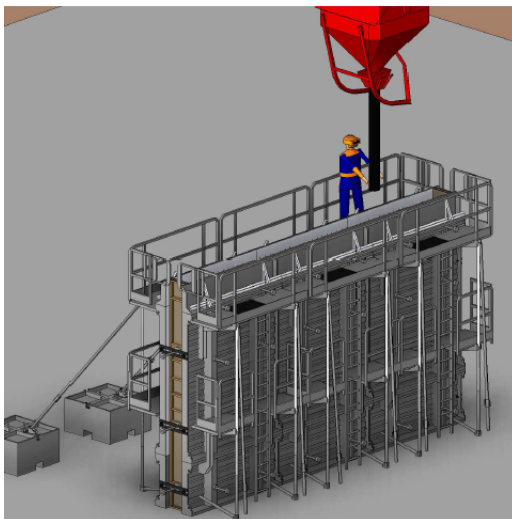


FIGURE 3.5: Phase de bétonnage

maintien de la chaussette, le tronc penché vers l'avant lors du retrait de celle-ci ou la mise en place des aciers en tête de voile ou encore accroupi ou à genoux lorsqu'il vibre le béton. Enfin, il est amené à se retrouver en haut de la passerelle ce qui augmente le risque de chute de hauteur.

3.2.6 Le nettoyage des panneaux

Le nettoyage des panneaux permet de les préparer les banches au coulage du jour suivant. Le compagnon est peu exposé aux risques lors de cette phase. Il peut y être exposé en inhalant des poussières de bois ou de silice. Le danger peut être occasionné par un tronc trop penché en avant lors du dépôt des déchets dans la benne ou le nettoyage du plancher.

Toutes les étapes du mode opératoire d'utilisation de la banche représentent un risque sur la santé du compagnon. Pour répondre à ces problématiques, il existe plusieurs solutions qui sont mises en place par l'entreprise. Bouygues Construction a apporté des améliorations significatives au matériel. Parmi ces améliorations, on retrouve le béton auto-plaçant qui supprime le vibrage, l'allègement du matériel comme l'utilisation de mannequins en aluminium à la place du bois ou encore des barrettes allégées. Des boîtiers de décompression pour les tiges, des outils anti-vibrations ou encore une barre à mine plus légère. L'ambition de Bouygues Construction est également d'avoir une banche « Zéro effort » en travaillant sur une nouvelle banche plus innovante avec par exemple, des organes de réglages dans des zones moins contraignantes. D'autres solutions sont également mises en place. Parmi ces solutions, on retrouve les séances d'échauffement, les compagnes de prévention et de sensibilisation. Ce sont des

démarches de préparation physique et mentale et de prise de conscience des limites du corps. L'entreprise à également recours aux formations.

3.3 Banche et formation

Les banches sont des coffrages de fabrication industrielle destinées à réaliser des murs en béton. La mise en place d'une banche nécessite plusieurs étapes. Ces étapes représentent toutes un risque sur la santé et la sécurité des compagnons. Il est donc crucial de bien maîtriser le mode opératoire afin d'éviter les blessures. Une formation adéquate est donc nécessaire pour mieux comprendre l'outil et l'utiliser efficacement.

La formation des coffreurs bancheurs est composée de deux parties. Dans la première partie, le formateur explique de manière générale la procédure, les risques liés à la manipulation de la banche en matière d'ergonomie, de geste et de posture afin d'éviter tout accident. Dans la deuxième partie, une session pratique a lieu au cours de laquelle les stagiaires manipulent le coffrage et se forment notamment à l'utilisation de la barre à mine. Cette session permet aux compagnons de manipuler la banche et de se former à la bonne position à adopter pour la manipuler. Lors de cette session, la vigilance du formateur est fortement requise. D'une part, toute mauvaise manipulation lors de l'utilisation des outils peut provoquer le basculement du coffrage. D'autre part, tout mauvais geste ou posture lors de la manipulation (pendant le montage par exemple) peut entraîner des blessures plus ou moins graves pour le stagiaire. Les différentes étapes de la mise en place du coffrage sont les suivantes :

1. Montage du coffrage sur le terrain (Fig. 3.6a),
2. Levage du coffrage avec la grue (Fig. 3.6b),
3. Stabilisation du panneau fixe (limite extérieure du mur) (Fig. 3.6c),
4. Mise en place du compas pour stabiliser le deuxième panneau (Fig. 3.6d),
5. Fermeture du voile (rapprochement du deuxième panneau).

Cette dernière étape est très importante et très délicate car le deuxième panneau détermine la profondeur souhaitée du mur. Le compagnon doit donc déplacer le panneau sur de courtes distances pour atteindre la profondeur souhaitée. Il y a deux façons de fermer le voile :

1. Fermeture à l'aide de la grue (Fig. 3.7a) : Le compagnon relie le panneau mobile à la grue, et avec les instructions qu'il donne au conducteur de la grue, pousse le panneau à l'endroit prévu. Fermeture à la barre à mine : Généralement effectuée à courte distance. Le compagnon utilise une barre métallique qu'il place sous



(a) Montage de la banche



(b) Levage de la banche à la grue



(c) Stabilisation de la première peau coffrante



(d) Stabilisation à l'aide du compas

FIGURE 3.6: Mise en œuvre de la banche

la banche et effectue un mouvement de haut en bas avec la barre pour soulever légèrement le panneau et le déplacer dans la direction souhaitée (avant ou arrière, droite ou gauche).

2. Fermeture à la barre à mine (Fig. 3.7b) : Généralement effectuée sur des distances courtes. Le compagnon utilise une barre métallique qu'il place sous la banche et effectue un mouvement de haut en bas avec la barre pour soulever légèrement le panneau et le déplacer dans la direction souhaitée (avant ou arrière, droite ou gauche).



(a) Fermeture du voile à la grue



(b) Fermeture du voile à la barre à mine

FIGURE 3.7: Fermeture du voile de banche

Nous avons décidé de nous concentrer sur la deuxième méthode : La fermeture à la barre à mine. Cette méthode représente un risque pour la santé du compagnon, et

qui se manifeste en particulier par l’apparition de troubles musculosquelettiques liés au travail [Valero *et al.*, 2016]. Comme le souligne Welch, la répétition des gestes lors du levage du panneau occasionne un risque d’inconfort et de douleur persistante [Welch *et al.*, 2000]. Ces actions répétitives lors de la fermeture (mouvement rapide vers le bas) additionnées au poids du panneau, à l’état du sol et au nombre de panneaux à fermer sont des facteurs qui peuvent entraîner des TMS et peuvent augmenter le risque d’accidents pouvant affecter le compagnon. Il est donc nécessaire d’assurer une bonne formation à l’utilisation de la barre pour minimiser les risques et assurer la sécurité des compagnons sur le chantier.

Les formations existantes sont donc nécessaires et couvrent à la fois la théorie et la pratique. Pourtant, il n’existe aucun outil qui permet d’acquérir des données lors de la session de formation pratique. En effet, ni la barre à mine ni la banche ne sont équipées de capteurs pouvant remonter des informations et permettant d’évaluer les efforts fournis par le compagnon pendant la session de formation (pour l’analyse de la performance dans le temps par exemple). Il n’existe donc pas d’évaluation quantitative de l’impact d’une utilisation prolongée de la barre à mine. De même, l’évaluation de la posture du compagnon lors de l’exécution de la tâche n’est pas accompagnée d’outils de mesures, invasifs ou non invasifs. L’analyse dépend de l’expertise du formateur, qui observe le compagnon pendant la séance et donne ses consignes. Son analyse est donc subjective.

Dans le chapitre 2, nous avons vu que la RV est un outil intéressant pour la formation. Dans la construction, la RV est un bon moyen pour sensibiliser les compagnons aux risques de leurs métiers de par l’immersion qu’elle offre. Elle peut également servir à les former aux procédures liées à l’utilisation des matériels. Dans la suite, nous verrons le cas de la formation à la mise en œuvre de la banche.

3.4 Spécification de la formation au poste de travail de banche en réalité virtuelle

La RV est un bon outil de formation, facile à mettre en place et qui permet de créer facilement du contenu grâce à des modèles 3D. Dans la construction, et depuis la démocratisation du BIM, les modèles 3D des outils et de matériels de chantier sont disponibles pour aider les ingénieurs méthodes à l’organisation du chantier. Ces modèles 3D sont accompagnés de modes opératoires, communiqués aux compagnons, pour

faciliter la mise en place des matériels correspondants. La RV peut être un moyen de formation sur ces modes opératoires.

Nous avons développé une application de RV reprenant un cas d'usage de la stabilisation de la banche, un outil très important dans la construction. C'est une étape importante du processus de montage et de l'utilisation du coffrage. En effet, pour pouvoir utiliser la banche, il faut avant tout la stabiliser. Dans le cas d'une mauvaise stabilisation, le panneau risque de basculer et d'écraser les opérateurs ou causer des dommages matériels. Il existe deux types de stabilisation :

- La stabilisation au compas pour des hauteurs jusqu'à 4,85 m (Fig. 3.8a),
- La stabilisation par les étais pour toutes les hauteurs de banche (Fig. 3.8b).



(a) Banche stabilisée par compas



(b) Banche stabilisée par étais

FIGURE 3.8: Stabilisation de la banche

C'est ce cas d'étude qui fera l'objet d'une première application de formation en RV.

3.5 Évaluation d'une application en réalité virtuelle en version visuelle

Une première approche a été proposée. Elle se base sur un instance du modèle de formation (Fig. 3.9).

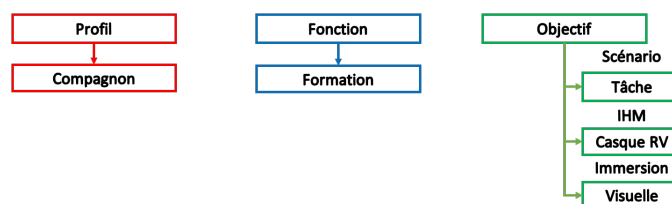


FIGURE 3.9: Instance du modèle de formation du compagnon pour l'application de réalité virtuelle visuelle

Nous avons fait le choix de scénariser une tâche donnée et de proposer une immersion visuelle dans un casque de RV. L’objectif est d’évaluer l’approche auprès d’opérateurs.

Nous avons développé une application de RV reprenant la stabilisation de la banche. Nous nous sommes concentrés sur la stabilisation par les étais. L’objectif était de recueillir les retours de différents experts sur l’impact de la RV pour la formation.

3.5.1 Première application développée en réalité virtuelle

La stabilisation de la banche nécessite un certain nombre d’ajustements au niveau de l’étais. Ces étapes sont les suivantes :

1. Enlever la goupille,
2. Enlever la tige qui maintient l’étais,
3. Régler l’étais afin d’aligner le coffrage en position verticale,
4. Replacer la tige et la goupille une fois que l’étais est au sol,
5. Serrer l’étais pour finaliser l’ajustement.

Ces étapes présentent un risque de pincement ou de chute d’objet et il faut donc les maîtriser pour éviter tout accident. Nous avons donc développé une application pour former à la stabilisation.

Déroulement de la séance

L’expérience commence dans un environnement virtuel sans limite afin d’exclure toute limite physique de l’environnement physique, comme le décrit l’auteur dans [Inter-rante *et al.*, 2006]. Cet environnement sert également de support théorique. Les objectifs sont représentés à l’utilisateur sous forme de texte, d’images et de vidéos (Fig. 3.10).



FIGURE 3.10: Le support théorique pour l’application en RV de stabilisation de la banche

Dès qu’il est prêt, l’utilisateur doit s’équiper de ses EPI avant de se rendre sur le chantier. Une fois équipé, l’utilisateur se retrouve plongé dans un EV de chantier extrait d’une maquette BIM (Fig. 3.11).

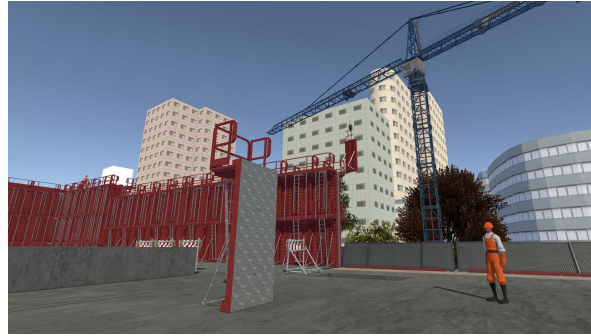


FIGURE 3.11: Chantier virtuel extrait d'une maquette BIM

La banche se retrouve devant lui et il doit effectuer les actions de stabilisation. Ces actions sont listées sur une liste d'objectifs et chaque étape est guidée par des flèches (Fig. 3.12) afin d'accompagner au mieux le stagiaire lors de sa formation.



FIGURE 3.12: Flèches indiquants la tâche à accomplir

Cette application a été développée sur le casque HTC Vive. Ce casque permet une immersion visuelle et auditive, immergeant ainsi l'utilisateur dans la reproduction de son environnement de travail (chantier virtuel, bruit de chantier ...). Les interactions dans l'EV sont assurées par une manette fournie avec le casque.

Le principe de l'application est de suivre les étapes inspirées du mode opératoire de l'outil. Nous avons établi un scénario et afficher des informations pour guider l'utilisateur (Fig. 3.13).

3.5.2 Évaluation de l'application développée

Cette application reprend une étape du mode opératoire : la fermeture du voile à la barre à mine. En reprenant le schéma définissant les profils et besoins, nous pourrions

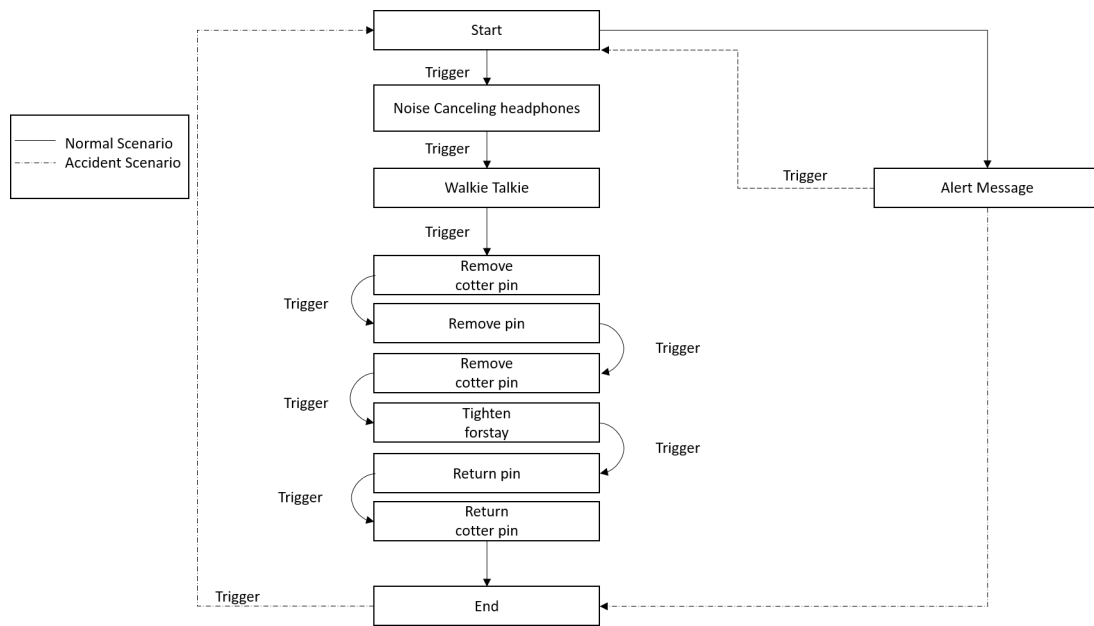


FIGURE 3.13: Principe de l’application RV de stabilisation de la banche

établir que la première modalité d’interaction dans le cas d’une formation à l’exécution d’une tâche pourrait être la RV.

On pourrait ainsi définir trois instances différentes. Le compagnon pourrait s’exercer

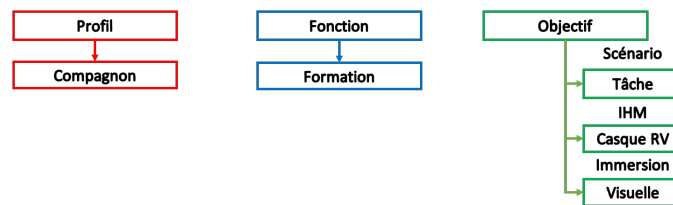


FIGURE 3.14: Méthodologie pour la formation sur la stabilisation de la banche en réalité virtuelle – Compagnon

en virtuel sur les outils avant de passer à la manipulation pratique. Cela permet de s’assurer de sa maîtrise des risques et de sa compréhension des procédures. Tout se passe en immersion visuelle et aucune action réelle n’est possible.

Une autre instance peut être définie, celle ayant comme profil, le formateur (Fig. 3.15).

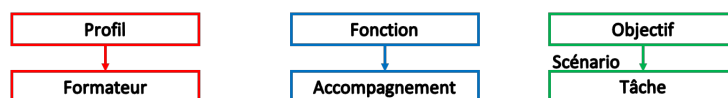


FIGURE 3.15: Méthodologie pour la formation sur la stabilisation de la banche en réalité virtuelle – Formateur

Ce dernier peut se servir d’un environnement virtuel afin d’accompagner l’apprentissage ou la maîtrise d’un mode opératoire. Cela peut être une sorte de passerelle

immersive et ludique entre la formation théorique et la formation pratique.

La dernière instance serait celle impliquant les ergonomes (Fig. 3.16). Ils pourraient

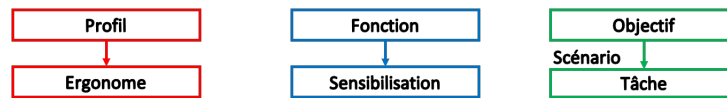


FIGURE 3.16: Méthodologie pour la formation sur la stabilisation de la banche en réalité virtuelle – Ergonome

accompagner les compagnons dans la compréhension des risques associés à la tâche et simuler des scénarios dangereux en environnement contrôlé.

Résultats et discussion

L'objectif de l'application développée est d'évaluer, auprès d'opérationnels, l'impact d'utiliser la RV pour former aux modes opératoires. Pour cela, nous avons testé l'application auprès de 18 personnes de profils différents : douze compagnons, trois formateurs et trois ergonomes.

Ce premier test nous a permis d'avoir les retours de différents corps de métier (Tab. 3.1). Tous les participants ont jugé l'approche intéressante pour transmettre le savoir théorique. Ils trouvent la méthode plus ludique que la formation théorique classique.

TABLE 3.1: Retour d'experts sur l'application RV

Profil	Participants	Points positifs	Critiques
Compagnons	12	Intéressant, intuitif	Absence de ressenti tactile
Formateurs	3	Approche ludique	Isolement, non collaboratif
Ergonomes	3	Intéressant pour l'évaluation de l'ergonomie	Absence de retour d'efforts

Ce premier test nous a également permis d'identifier une problématique importante : l'absence de retour haptique. En effet, les compagnons qui connaissent la réalité du terrain, nous ont rapporté que le serrage des étais n'est pas aussi facile en réalité. Ils ont parfois recours à des outils pour débloquer les étais, parfois coincés dû à l'usure du matériel. Aussi, la nature du terrain peut également compliquer la tâche. Il semble donc que l'absence de sensation au niveau des mains, ainsi que le manque de réalisme dans les gestes (les interactions étant assurées par les manettes), réduisent l'engagement des utilisateurs et l'impact de la formation sur eux. Les ergonomes sont également de cet avis. Même s'ils s'accordent à dire que la RV est un bon moyen pour évaluer l'ergonomie de l'outil, le manque de retour d'efforts ne permettrait pas d'avoir une

évaluation ergonomique complète. De plus, il n’y a pas de prise en compte les différents gestes et postures qui pourraient être induits par un effort donné.

Les formations sont axées principalement sur l’utilisation d’outils et la détection de risques sur un chantier. Elles sont orientées procédures et risques « immédiats » et ne traitent pas de problématiques à long terme comme l’exposition à des matières dangereuses ou toxiques ou encore des questions liées aux postures. En effet, il n’existe pas à ce jour de contenu plus ludique pour expliquer les règles à respecter et sensibiliser les compagnons. Ils sont souvent conscients des risques mais un sentiment d’« invincibilité » tend à subsister chez cette population qui aime les défis physiques présents dans leur travail.

Discussion sur les besoins

Bien que la RV résolve les questions d’immersion, il reste un point, en matière de formation qui n’est pas totalement couvert. En effet, les interactions avec l’environnement virtuel (EV) se fait grâce à des manettes. Ces manettes restent des outils invasifs auxquels les compagnons de chantier ne sont pas habitués. D’autres solutions sont apparues comme des gants instrumentés permettant de visualiser ses mains dans la RV. Là encore, le réalisme manque à l’appel. Pour des formations lors de manipulation d’objets, le ressenti du toucher est important. Il est donc nécessaire d’ajouter aux immersions visuelle et sonore fournies par le casque, une immersion haptique.

La formation aux gestes englobe la formation à l’exécution d’une tâche qui elle même nécessite inévitablement, au-delà de la compréhension de la procédure, une prise en compte et une formation aux risques qui lui sont liés. Mais au-delà du risque immédiat, il est important de s’assurer de la compréhension et de la prise de conscience de l’existence de risques différés. Un compagnon est un salarié sur le chantier. Il est donc possible qu’il développe des TMS. Une formation sur son poste de travail est importante. Tous les volets (procédures, risques santé sécurité...) doivent être abordés. Dans le cas de l’analyse de mouvement, l’utilisation de la RV et d’un système d’analyse de mouvement peut s’imposer comme modalité intéressante. Elle permet aux formateurs et ergonomes d’accompagner la prise de recul des compagnons par rapport à certaines tâches, qu’ils estiment non contraignantes, comme être accroupi, penché en avant ou les bras au-delà de l’horizontal.

Dans le cas d’une analyse de gestes lors de la manutention de charge, la RV peut s’avérer très peu pertinente. La modalité d’interaction doit répondre à un critère important : Le réalisme. Le compagnon a besoin de ressentir l’effort, de faire « comme sur chantier ». Il n’a pas forcément le temps sur chantier, dans un souci de respect

des cadences imposés, de prendre du recul sur ce qu'il fait. Il faut donc lui apporter l'information sous un format qu'il peut comprendre. Sans retour haptique, une analyse des efforts et des gestes n'aurait aucun sens. La restitution de l'effort permet d'analyser en condition pseudo-réelle et contrôlée, le mouvement, l'effort et l'impact sur la posture qu'induit une tâche donnée. Cela permet également d'acquérir un certain nombre de métriques sur ces efforts.

Pour les ergonomes, c'est un moyen d'analyser l'outil actuel, en se basant sur une analyse quantitative de la posture, et d'imaginer de possibles améliorations. Pour les formateurs, c'est un moyen d'adapter la formation au profil qu'il a devant lui en tenant compte de son degré d'expertise (jeune recrue, compagnon expert, intérimaire...).

Nous avons donc conçu un prototype de formation au geste intégrant, en plus de la RV, un retour haptique et une analyse du mouvement.

Dans ce chapitre, nous avons pu voir que la complexité et le nombre de tâches de la mise en œuvre de la banche en faisaient un outil à risque. Les compagnons bancheurs sont exposés à plusieurs risques sur leur santé pouvant engendrer des maladies professionnelles comme les TMS, notamment lors de l'utilisation de la barre à mine. Pour répondre à cet enjeu, les entreprises du BTP mettent en place des campagnes de prévention, d'amélioration du matériel et de formation. Ces formations ont pour objectif de sensibiliser les compagnons aux problématiques liées aux TMS. Les formations tendent à se numériser. La RV est une des solutions les plus utilisées. Nous avons développé une application de formation à la stabilisation de la banche, une étape importante de la mise en œuvre. L'application a été bien accueillie par les différents experts mais un constat est unanime : le manque d'interaction tactile influe fortement sur le réalisme de l'application. Il a été également souligné que pour former au bon geste et à la bonne posture, l'utilisation de la RV seule peut s'avérer incomplète, dû à l'absence d'un retour de force.

L'objectif des chapitres suivants sera de proposer une première version d'une plateforme intégrant une interaction homme-machine et d'évaluer ensuite, son retour auprès de profils compagnons.

Dans le chapitre suivant, nous présentons la plateforme *Virtual Compagnon*. Cette plateforme associe la RV et une plateforme à retour de force pour la formation à l'utilisation de la barre à mine pour l'ajustement des banches. Nous présenterons les spécifications fonctionnelles de la plateforme et nous détaillerons la partie conception mécanique, électronique et le développement de l'environnement virtuel et de suivi de posture.

Chapitre 4

Proposition pour la formation d'un compagnon : la plateforme *Virtual Compagnon*

Sommaire

4.1	Spécifications fonctionnelles de <i>Virtual Compagnon</i>	90
4.2	Spécifications de <i>Virtual Compagnon</i>	93
4.2.1	Conception de la structure et des actions du compagnon	94
4.2.2	Instrumentation de la plateforme	97
4.2.3	Définitions des fonctions d'immersion et des composants virtuels	100
4.2.4	Capture de mouvement	104

Comme expliqué dans le chapitre 1, la formation pratique se déroule en plein air et nécessite l'intervention d'une grue pour la mise en place du coffrage. De plus, des conditions météorologiques dégradées (températures élevées, périodes nuageuses...) peuvent modifier considérablement le déroulement de la formation. *Virtual Compagnon* est un simulateur de Réalité Mixte (RM) composé d'une plateforme robotique et d'un casque immersif RV (HTC Vive). Cette plateforme est dédiée à la formation des compagnons aux risques et aux gestes. Nous avons choisi en particulier les bancheurs. L'objectif de la formation est la bonne utilisation de la barre à mine. *Virtual Compagnon* permet ainsi une immersion visuelle et auditive grâce au casque de RV mais également, grâce à la plateforme robotique, de stimuler le sens du toucher de l'utilisateur en fournissant un retour de force pour plus d'immersion.

Dans ce chapitre, nous présenterons les spécifications fonctionnelle de la plateforme et décrirons les différentes étapes de conception du simulateur.

4.1 Spécifications fonctionnelles de *Virtual Compagnon*

Comme vu au chapitre 3, les banches sont des outils apparus au XVII^e siècle. Elles sont posées face à face et servent à mouler avec du béton, armé généralement, des parties de pan de mur épais. La banche B07 (pour Bouygues–2007) a été conçue dans le cadre d'un partenariat entre Bouygues Construction et Outinord, spécialiste de conception et de fabrication de structures métalliques [Outinord, 2020]. Cette collaboration, entre les bureaux d'étude des deux entreprises, fait partie des objectifs du groupe Bouygues d'utiliser un outil unique et de qualité sur tous les chantiers à travers le monde. Il existe plusieurs configurations possibles avec des largeurs de 2,4 m, de 1,2 m et de 0,6 m avec des hauteurs de 2,85 m, 1,5 m, 1 m ou encore 0,5 m. Le panneau de coffrage sur lequel nous avons décidé de travailler est un panneau de 1,2 m de largeur et 2,85 m de hauteur (Fig. 4.1).

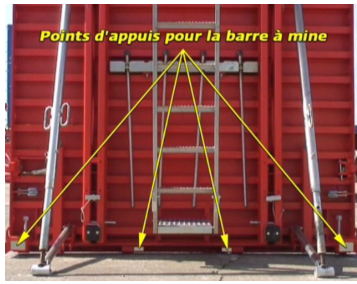


FIGURE 4.1: Banche B07 de 120 cm × 285 cm

Comme discuté dans le chapitre 3, les procédures de mise en place de la banche sont nombreuses. Cela va de la mise en place des lests, des abouts de coffrage au coulage du béton en passant par la mise en place des armatures et le serrage des tiges. Toutes les étapes du mode opératoire de mise en œuvre de la banche représentent un risque sur la santé et la sécurité du compagnon, comme expliqué dans la section 3.2. L'une des étapes de mise en œuvre est la fermeture, ou l'ajustement, du voile à la barre à mine. Le panneau présente, au total, six positions dans lesquelles elle peut être insérée ; quatre devant et deux emplacements sur les côtés, un de chaque côté (Fig. 4.2a).

La barre à mine mesure 1,75 m de hauteur et 0,1 m de largeur et pèse 5,2 kg. Elle est formée d'un manche en alliage aluminium et le talon et la flamme sont conçues en acier forgé [Leborgne, 2020]. Elle compte deux côtés différents (Fig. 4.2b). L'angle entre ces deux côtés est de $\frac{3\pi}{4}$.

L'utilisation de la barre à mine présente des risques sur la sécurité, comme la chute



(a) Les points d'appui de la barre à mine



(b) Barre à mine Leborgne [Leborgne, 2020]

FIGURE 4.2: La barre à mine et les emplacements sur la banche

de plain-pied ou les risques de pincements, et des risques sur la santé dus aux gestes répétitifs pouvant causer des TMS. Pour répondre à cet enjeu, l'entreprise a engagé un certain nombre de démarches afin de limiter ces risques. Cela passe par l'innovation constante sur les chantiers, les campagnes de sensibilisation et les formations, entre autres. La formation est un passage obligé pour tous les collaborateurs, nouvel arrivant ou pas. Elle permet d'inscrire le collaborateur dans la culture de l'entreprise, de le former sur les outils et les procédures propres à l'entreprise et de le sensibiliser aux risques liés à son métier. Différents formats de formation existent. La facilité d'accès aux outils numériques tels que les ordinateurs, les tablettes ou encore les smartphones, a donné naissance à un nouveau format de formations : la formation numérique. L'avantage de ces formations est l'accessibilité à tout moment à l'information. Certaines de ses formations revêtent un aspect ludique, de par l'apparition de système de score ou d'avatars. C'est le serious game (SG).

Comme expliqué dans le chapitre 1, le SG est un contenu informatisé combinant des aspects sérieux (enseignement, apprentissage...) avec des ressorts ludiques [Alvarez, 2007]. Le contenu du SG doit répondre à un certain nombre de prérequis :

- Quel est le profil à qui est adressée la formation ?
- Quel est l'objectif pédagogique derrière ?
- Quel scénario est proposé ?
- Quel format d'interaction est proposé ?

Dans notre cas, nous adressons la formation aux ouvriers de chantier ; les compagnons mais également les formateurs et les ergonomes. Les compagnons sont une population habituée à travailler de ses mains. Notre cible est majoritairement masculine, peu ou pas du tout à l'aise avec les nouvelles technologies et qui compte sur l'« expérience terrain » et l'apprentissage par les pairs, ou le compagnonnage.

L'objectif visé est de sensibiliser notre cible aux risques liés à l'utilisation de la barre à mine, apporter des métriques aux formateurs pour mieux les accompagner et fournir

un outil d'analyse du mouvement aux ergonomes.

En proposant comme modalité d'interaction un environnement RV, un retour haptique et un système d'analyse de mouvement on peut s'assurer que :

- Le compagnon est immergé dans un environnement qu'il connaît (chantier) et effectue les tâches inspirées du mode opératoire réel,
- La plateforme robotique pourrait reproduire un effort proche de l'effort réel et en intégrant le même outil que celui utilisé sur chantier : la barre à mine. Le compagnon pourra donc effectuer le geste réel et environnement sécurisé,
- Le formateur pourrait adapter la formation en fonction du niveau de base du stagiaire en activant les différents modes de la plateforme,
- Le formateur dispose des métriques que la plateforme renvoie et l'analyse en temps réel du mouvement pour adapter ses recommandations.

Pour rappel, lors de différents échanges avec des experts chez Bouygues Construction, les compagnons sont conscients des risques. Cela dit, dans un soucis de bien faire et pour respecter les délais impartis, il est possible, pour gagner du temps, qu'ils se mettent en danger. Notre objectif est donc de sensibiliser les compagnons aux risques tout en mettant en évidence que se mettre en danger ne fait pas toujours avancer les choses dans le bon sens. De plus, notre but est de les sensibiliser à un risque sur la santé qui sont les TMS. Ces troubles font partie de la famille des risques différés. L'impact sur le corps des compagnons peut être visible tardivement. Il est donc important, dans notre démarche, en plus d'expliquer que se mettre en danger n'est pas aller vite, qu'aller fort n'est pas aller vite non plus. Cela définit ainsi le format d'interaction. Nous avons donc enquêté auprès d'experts pour affiner notre recherche de support de formation. Les compagnons, une population qui rajeunit de plus en plus, n'est pas technophile. Il est donc important de choisir un format de présentation des formations qui soit attrayant et qui capte l'attention de la cible. Le scénario proposé doit donc être proche du scénario réel. Dans notre cas, il faut reproduire l'action de fermeture de la banche à la barre à mine. Les ordinateurs ou les tablettes restent des outils invasifs et complexes. Un compagnon n'est pas habitué à les utiliser. De plus, ces outils ne sont pas immersifs. Pour le compagnon, cela garde un côté « gadget ». L'impact de la formation est donc faible. De plus, lors de certains ateliers, nous avons remarqué que le fait de se savoir « observé » contribue à installer une forme de blocage et de rejet de la technologie. Nous avons donc pensé à la RV immersive. La RV regroupe un ensemble de technologies permettant à un utilisateur de se sentir présent dans un environnement artificiel. Grâce à la RV, il est possible de reproduire une représentation en trois dimensions d'un chantier, un endroit que le compagnon connaît bien. Il est également possible de créer plusieurs scénarios et

interactions dans cet environnement. Cela dit, pour une population manuelle, utiliser de la RV avec des moyens d'interactions auxquels ils ne sont pas habitués, peut également fragiliser l'impact de la formation. Il est donc intéressant d'intégrer dans notre réflexion l'élément central de la tâche que nous souhaitons reproduire : la barre à mine. Cela implique donc une immersion visuelle et tactile en intégrant des éléments que le compagnon connaît ; un chantier et une barre à mine. Pour cela, nous avons mis en place un serious game qui reprend cette étape en associant la RV et une plateforme robotique à retour de force. L'objectif de ce serious game est de sensibiliser le compagnon au risque, en matière de posture, lié à l'utilisation de la barre à mine lors de la fermeture du voile de banche. Cette plateforme doit répondre aux critères de fidélité au geste reproduit, de réalisme et d'immersion. A travers cette interaction, le compagnon doit être en mesure de comprendre l'impact de l'utilisation de la barre à mine sur sa santé. Nous avons choisi de nommer notre simulateur *Virtual Compagnon*. Dans la suite, nous détaillerons les différents développements du système.

4.2 Spécifications de *Virtual Compagnon*

Le réalisme de la simulation contribue fortement à l'acquisition de compétences techniques et non techniques. Dans notre cas, *Virtual Compagnon* est destiné à la formation des compagnons afin de les pousser à adopter la bonne posture lors de l'utilisation de la barre à mine, et cela en alliant la RV et une plateforme à retour de force.

Il est donc nécessaire de :

- Dimensionner la plateforme pour reproduire fidèlement le ressenti tactile et haptique,
- Recréer un EV immersif, un environnement de chantier et une banche virtuelle,
- Mettre en place le système de suivi de posture.
- Assurer la connexion entre la plateforme et l'EV.

La plateforme doit répondre à certaines exigences. Les compagnons connaissent la réalité du terrain. La plateforme doit retranscrire une sensation d'effort assez importante pour rester fidèle à la sensation réelle.

Le compagnon n'est pas habitué à l'utilisation de la RV. Il faut donc essayer de reproduire le plus fidèlement possible un EV qui lui est familier, et essayer de se rapprocher le plus possible de la réalité terrain.

Le système de suivi de posture est un outil important pour les formateurs d'une part, car il leur apporte une assistance lors de l'évaluation du geste, et aux compagnons de l'autre, car l'objectif est qu'ils maîtrisent ce geste pour éviter les risques sur leur santé.

La connexion entre la plateforme et l'EV permet de s'assurer que les actions effectuées par l'utilisateur soient visibles dans la RV. Ceci renforce le réalisme de l'application.

Dans la suite, nous décrirons en détail différentes étapes de conception de *Virtual Compagnon*.

4.2.1 Conception de la structure et des actions du compagnon

L'objectif du simulateur *Virtual Compagnon* est d'assurer à l'utilisateur une immersion tactile en fonction de l'immersion visuelle. Pour cela, il faut concevoir un système capable de reproduire le ressenti de l'effort qu'engendre l'accomplissement de la tâche ; l'utilisation de la barre à mine pour l'ajustement du voile de banche.

Pour déplacer le coffrage, le compagnon place la barre à mine dans l'un des emplacements prévus, et effectue un geste de haut en bas (Fig. 4.3). La barre est utilisée comme levier.



FIGURE 4.3: Fermeture de la banche à la barre à mine – Le compagnon applique une force verticale sur la barre pour déplacer le panneau

Cette action de rotation déplace le panneau dans la direction souhaitée. Or, ces déplacements sont petits de par l'angle de rotation que permet la barre et de par le poids de la banche. Par conséquent, nous pouvons considérer cette rotation comme une translation.

Afin de trouver l'effort exercée sur la barre à mine, nous devons d'abord étudier l'effort maximal, à hauteur de coudes, que peut exercer l'être humain en traction et en poussée.

Les valeurs du tableau (Tab. 4.1) montrent les limites supérieures des forces de poussée et de traction verticales [The Eastman Kodak Company, 2004].

Ces tâches doivent être conçues pour des exigences de force considérablement plus faibles que celles indiquées dans le tableau. Nous pouvons donc trouver dans ce tableau

TABLE 4.1: Limites des forces de poussée et de traction verticales [The Eastman Kodak Company, 2004]

Conditions	Limite supérieure de la force (N)	Exemples
Tirer vers le bas au-dessus de la tête	540	Activation d'une commande manuelle
Tirer vers le bas au niveau des épaules	200	Utilisation d'un palan à chaîne
Tirez vers le haut à -25 cm du sol	315	Câblage d'une corde
Tirer vers le haut à hauteur des coudes	148	Relever un couvercle
Tirer vers le haut hauteur de l'épaule	75	Soulever un couvercle paume vers le haut
Pousser vers le haut à hauteur d'épaule	200	Placer un objet sur une étagère haute
Pousser vers le bas à hauteur du coude	290	Emballage de caisses

la force maximale lorsqu'on pousse vers le bas à la hauteur des coudes, qui a pour valeur 290 N(Newton). Nous avons décidé d'utiliser 350 N pour améliorer le coefficient de sécurité. Partant de cette valeur, il faut calculer la force en bout de barre à mine suite à l'effort appliqué par le compagnon. Pour cela, nous utilisons la formule :

$$FL \sin \theta = F_{\alpha} l \sin\left(\frac{3\pi}{4} - \theta\right) \quad (4.1)$$

Avec F , la force de poussée vers le bas sous la hauteur du coude, L le côté le plus long de la barre à mine, θ l'angle entre le côté le plus long et la direction verticale, F_{α} la force agissant sur la pointe, l est la longueur de la pointe.

La figure (Fig. 4.4) montre que la force maximale agissant sur la pointe de la barre à mine est proche de 3800 N .

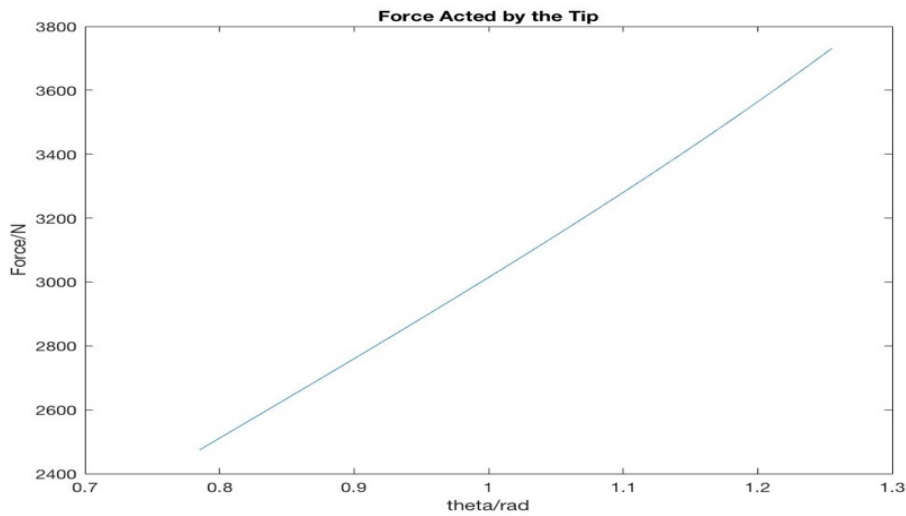
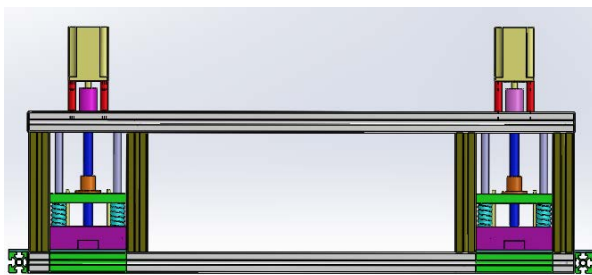


FIGURE 4.4: La force appliquée par la pointe

Ainsi, nous avons conçu un système pour simuler le soulèvement de la banche, permettant de reproduire l'effort ressenti par le compagnon. Cet effort est réduit. Nous n'avons pas reproduit tous les efforts mais nous sommes assurées d'avoir une sensation assez importante pour augmenter le réalisme.

En partant des caractéristiques du panneau, nous avons prévu deux emplacements de position de barre à mine par côté, un à l'avant et un sur le côté. La structure est représentée (Fig. 4.5a).



(a) Représentation 3D de la plateforme robotique de *Virtual Compagnon*



(b) Vue réelle de la plateforme robotique de *Virtual Compagnon*

FIGURE 4.5: La plateforme robotique de *Virtual Compagnon*

Le système est composé de deux plaques : une plaque fixe en haut et une plaque mobile en bas. Entre ces deux plaques, nous avons placé, par côté, quatre ressorts de fortes charges, de raideur $k = 212 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, de déflexion maximale de 19 mm et de longueur libre de 64 mm. La longueur de ces ressorts correspond à la distance entre les deux plaques. Lorsque la barre à mine est placée dans l'un des emplacements prévus, elle vient se placer sous la plaque mobile du système. Il suffit à l'utilisateur de pousser la barre de bas en haut pour déplacer la plaque mobile et ainsi compresser les ressorts.

La plateforme bénéficie également d'un développement électronique pour détecter le déplacement de la plaque grâce à la barre à mine et ainsi retranscrire les mouvements réels dans l'EV.

4.2.2 Instrumentation de la plateforme

L'objectif de la plateforme robotique est que le ressenti physique corresponde au contenu visuel présenté. En d'autres termes, quand l'utilisateur active la barre à mine et agit sur la plateforme, la banche virtuelle projetée dans le casque doit bouger en fonction des données fournies par la plateforme. Ces données-là sont envoyées à l'EV par les différents capteurs présents.

Le premier capteur, nécessaire au fonctionnement de la plateforme, est le capteur permettant de détecter la présence de la barre à mine. Étant donné que nous avons décidé de représenter plusieurs points d'insertion de la barre, il est nécessaire de renvoyer cette information à l'EV et de bouger le voile virtuel correspondant. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser un capteur de contact (Fig. 4.6).

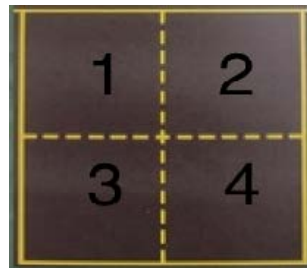


FIGURE 4.6: Capteur de présence barre

Les surfaces 1, 2, 3, 4 sont constituées de matériaux conducteurs; du cuivre dans notre cas. La zone supérieur 1-2 est séparée de la zone 3-4. Cela permet notamment de détecter la barre à mine peu importe la profondeur de son insertion. Lorsqu'elle est insérée dans l'emplacement prévu, le métal de la barre ferme le circuit électrique, ce qui nous signale sa présence.

Une fois la barre à mine insérée, et sa position par rapport à la plateforme connue (gauche ou droite), l'utilisateur est censé effectuer un geste de haut en bas pour bouger la plaque mobile. Dans la même optique qui est de renvoyer l'information du côté du voile à manipuler, il est nécessaire de connaître le taux de compression des ressorts mis en place entre les deux plaques, et qui sont censés reproduire cet effort résistant à l'effort fourni par l'utilisateur. Pour mesurer cette compression, nous avons opté pour un capteur à ultrasons (US). Ce capteur émet de courtes impulsions sonores à hautes fréquences, à intervalles réguliers, qui se propagent dans l'air. Lorsqu'elles rencontrent

un obstacle, ces ondes sont réfléchies et reviennent sous forme d'écho. La distance est calculée par rapport au temps d'émission et de réception des impulsions.

Pour vérifier le bon fonctionnement de ce capteur de distance, nous avons effectué un calcul de la distance mesurée pour un effort donné. Nous avons simplifié le fonctionnement et proposé un schéma (Fig. 4.7) et avons fait les hypothèses suivantes :

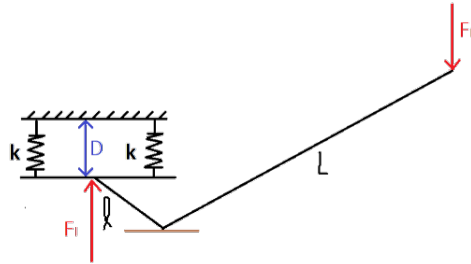


FIGURE 4.7: Schéma de fonctionnement simplifié

1. $F_l = 4 \times k \times d$, la force nécessaire pour déformer quatre ressorts d'une distance d est égale à la raideur du ressort multiplié par cette distance et multipliée par le nombre de ressorts comprimés,
2. $F_l = \frac{F_L \times L}{(l+M)}$, effet de bras de levier de la force F_L auquel on rajoute la masse.

On obtient ainsi l'équation :

$$F_L = \frac{(4 \times k \times d) - M}{\left(\frac{L}{l}\right)} \quad (4.2)$$

Après simplification, nous nous retrouvons avec :

$$F_L(d) = \alpha \times d - c \text{ avec } \alpha = 5333 \text{ et } c = 3.2 \quad (4.3)$$

Nous avons donc pu comparer les valeurs calculées grâce à cette équation et les valeurs indiquées par le capteur. Nous pourrions ainsi retrouver, pour une valeur de distance mesurée, l'effort appliqué par l'utilisateur.

Les valeurs transmises par les capteurs US permettent à l'EV de savoir à quelle hauteur soulever la banche lors de l'action de l'utilisateur. Ainsi, le ressenti physique de soulèvement correspond au rendu visuel dans le casque immersif.

Un dernier capteur est utilisé. En effet, le fonctionnement de la plateforme consiste en la compression d'un ensemble de ressorts pour rapprocher deux plaques, l'une fixe et l'autre mobile. Lorsqu'on relâche la tension appliquée aux ressorts, la plaque mobile

reprend sa position initiale. Un capteur de « fin de course » est placé en-dessous de cette plateforme pour confirmer son retour à l'état initial. Ce capteur se présente sous la forme d'un bouton, fermant un circuit électrique. Quand la plaque repose sur le bouton, le circuit est fermé et le système sait que la plaque est revenue à sa position initiale. Quand cette dernière est soulevée par l'action de l'utilisateur, le circuit est ouvert et le courant ne passe plus. C'est le principe du « tout ou rien », permettant ainsi de confirmer le côté sur lequel l'utilisateur opère.

Néanmoins, l'utilité du capteur de fin de course ne s'arrête pas là. En effet, nous avons ajouté des moteurs à la plateforme. Les moteurs choisis sont de type Brushless 24 V avec une puissance de 30 W, une vitesse maximale de $7 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ et pouvant fournir un couple de $30 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Ces moteurs ne sont pas nécessaires au fonctionnement de la plateforme. Cette dernière peut fonctionner en mode passif. Les moteurs restent cependant nécessaires pour la remise à la position initiale de la plaque mobile. La décompression des ressorts n'étant pas rapide, il est nécessaire de les assister, en simulant la gravité.

Cela dit, l'ajout des moteurs rajoute deux autres fonctionnalités :

- Le mode assistant qui facilite la manipulation du système et peut être utilisé pour former les débutants par exemple, ou en phase d'adaptation à ce mode d'interaction,
- Le mode résistant qui permet de simuler une charge plus lourde. La manipulation est plus difficile. Ce mode pourrait être utilisé pour simuler certaines situations, comme le déplacement du panneau de coffrage en situation réelle sans l'aide de la grue.

Ces deux modes ont été ajoutés pour deux raisons : la première raison est qu'ils permettent de proposer aux compagnons différents cas de figures de déplacement de la banche à la barre à mine (assistance de la grue, panneaux plus « légers », conditions environnementales particulières...) et ainsi donner au formateur le choix de créer plusieurs scénarios de formation'. La deuxième raison est que la fermeture du voile peut se faire à deux opérateurs. Dans ce cas de figure, la notion d'expertise entre en jeu. En effet, sur le chantier, les mécanismes et rythmes de travail (vitesse d'exécution, effort appliqué...) entre un bancheur expert et un bancheur débutant peuvent différer et ainsi avoir un impact sur l'exécution de la tâche. Ainsi, grâce aux différents modes, nous pouvons proposer différents scénarios pour former également à la collaboration entre les compagnons lors de la fermeture du voile à la barre à mine.

Pour traiter les données provenant des capteurs et pour déterminer le mode de fonctionnement des moteurs, nous avons opté pour des microcontrôleurs de type « *Arduino* ».

Nous en avons connecté trois en utilisant le protocole de communication I2C. Ce protocole synchrone de communication permet de connecter les microcontrôleurs entre eux avec la configuration Maître–Esclave (Master–Slave) (Fig. 4.8).

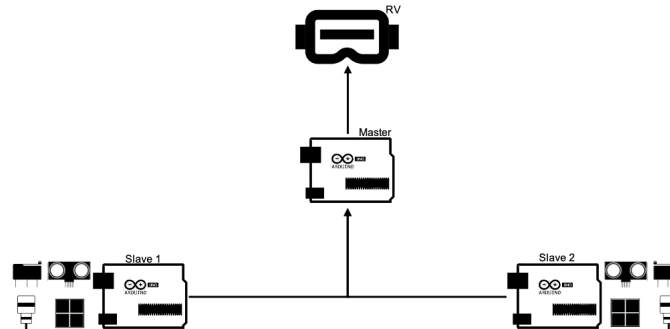


FIGURE 4.8: Architecture de contrôle

Un microcontrôleur esclave est utilisé par côté de la plateforme ; un à gauche et un à droite. Il permet d'émettre des requêtes aux capteurs qui lui sont assignés et en connaître les valeurs et les états. Le microcontrôleur maître s'occupe de la communication entre la plateforme et l'EV. D'un côté, il émet des requêtes aux esclaves et s'occupe de transmettre les données, par liaison série, à l'EV en cas de changement d'état signalé par l'un des microcontrôleurs esclaves. De l'autre, il communique aux microcontrôleurs esclaves le choix du mode (résistant, assistant, passif) et donc la configuration du moteur que l'utilisateur, formateur dans ce cas-là, choisit d'adopter. Ce sont les esclaves qui s'occupent du changement d'état du moteur. Cette configuration permet de fluidifier la communication entre l'EV et la plateforme. La liaison série entre le microcontrôleur maître et l'ordinateur est moins sollicitée et n'est activée qu'en cas de changement d'état de l'un ou l'autre des côtés de la plateforme.

4.2.3 Définitions des fonctions d'immersion et des composants virtuels

L'objectif de *Virtual Compagnon* est de proposer un outil de formation à la posture et au geste lors de la manipulation de la barre à mine pour l'ajustement des banches. Il repose sur une plateforme robotique et un environnement immersif en RV. Un système de suivi de posture est également présent.

Environnement virtuel

L'environnement virtuel (EV) est une composante importante de l'application que nous proposons. En effet, l'EV permet deux choses :

1. L'immersion visuelle et auditive du compagnon dans un environnement qu'il connaît,

2. La visualisation des actions qu'il effectue avec la barre à mine pour plus de réalisme.

Pour le premier point, nous avons travaillé sur la reproduction d'un environnement de chantier à partir d'un modèle 3D extrait de la maquette BIM (Fig. 4.9). Le compagnon connaît bien le chantier. L'EV doit donc être le plus proche possible. Burkhardt affirme qu'une simulation en RV réaliste est efficace et convaincante si la cible maîtrise la tâche et connaît bien son contexte [Burkhardt, 2003].



FIGURE 4.9: Représentation 3D d'un chantier extrait d'une maquette BIM

Cette représentation permet d'immerger le compagnon dans son environnement de travail. Elle doit être assez réaliste.

Il retrouve les outils, les machines qu'il connaît et avec lesquels il est amené à travailler dans la réalité. Une ambiance sonore est également ajoutée pour renforcer l'immersion visuelle par une immersion sonore.

Nous avons également représenté une ville autour du chantier pour donner vie à l'application (Fig. 4.10)



FIGURE 4.10: Modélisation d'une ville autour du chantier

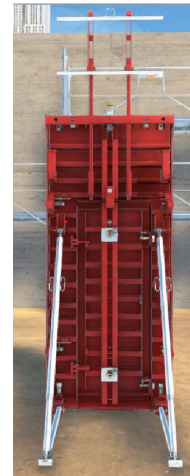
L'objectif de l'application RV de *Virtual Compagnon* est de former à l'utilisation de la barre à mine lors de l'ajustement de la banche. Nous avons donc représenté ces

deux objets. Nous avons utilisé le modèle du fabricant pour le premier (Fig. 4.11a) et le modèle des ingénieurs méthodes de Bouygues Construction pour le deuxième (Fig. 4.11b).

La représentation 3D de la banche est ensuite positionnée de telle sorte que les emplacements prévus pour la barre à mine coïncide avec les emplacements prévus sur la plateforme robotique.



(a) Modèle 3D de la barre à mine



(b) Modèle 3D de la banche

FIGURE 4.11: Modèles 3D utilisés dans l'application RV de *Virtual Compagnon*

Ceci est fait à l'aide des Vive Tracker (Fig. 4.12). Ces capteurs font partie du même environnement de développement que le casque HTC Vive utilisé, et s'intègrent donc facilement dans la programmation.



FIGURE 4.12: Vive Tracker

Une fois les capteurs placés sur la plateforme, ils apparaissent dans l'EV. Nous avons fait en sorte qu'au démarrage de l'application, le modèle 3D se positionne automatiquement au bon endroit. La barre à mine pouvant être placée des deux côtés de la banche, et donc de la plateforme, nous avons utilisé en réalité deux banches virtuelles. En effet, sur le logiciel de création du contenu virtuel, un objet 3D ne peut pas avoir plus d'un point de pivot. La banche virtuelle est supposée bouger en fonction du mouvement du

compagnon. Or, si on donne la possibilité au compagnon de travailler du côté gauche ou du côté droit de la plateforme, il faut que la banche s'adapte et tourne du bon côté et du bon angle. Nous avons donc utilisé deux banches virtuelles : une dont le pivot est à droite et l'autre dont le pivot est à gauche. Dans l'EV, elles sont confondues, et s'activent ou se désactivent en fonction de la position dans laquelle la barre à mine est insérée. L'information de la position de la barre à mine est renvoyée à l'EV par le capteur de présence de la barre. Chaque banche virtuelle doit donc se positionner correctement par rapport à la plateforme. Pour cela, nous avons fixé sur des supports imprimés par imprimante 3D, un Vive Tracker de chaque côté de la plateforme (Fig. 4.13). Chaque capteur représente la position d'un pivot de la banche virtuelle.



FIGURE 4.13: Emplacements des Vive Tracker (encadrés en blanc) pour le positionnement de la banche virtuelle

Nous avons utilisé ce même principe pour la barre à mine. Le compagnon devant tenir la barre entre ses mains et la placer dans la plateforme. Il doit donc pouvoir facilement la repérer et la placer. Contrairement à la plateforme qui est fixe, la barre à mine bouge. Pour plus de précision lors du suivi de la barre, nous avons décidé de placer deux capteurs Vive Tracker dessus (Fig. 4.14).



FIGURE 4.14: Suivi de la barre à mine à l'aide des Vive Tracker (encadrés en blanc)

Enfin, pour augmenter l'immersion et le réalisme de l'application, nous avons décidé d'intégrer la visualisation des mains. Pour cela, nous avons utilisé les gants « Noitom Hi5 » (Fig. 4.15).

Les Hi5 de Noitom sont des gants destinés au grand public, faciles à utiliser. Ils sont équipés d'une centrale inertielle à neuf axes et utilisent un système de suivi optique. Ces gants sont facilement intégrables dans l'environnement de développement utilisé.

Les gants permettent de s'affranchir des manettes prévues pour le casque d'une part, et d'immerger plus efficacement l'utilisateur d'une autre part. Ainsi, l'intégration des



FIGURE 4.15: Gants de réalité virtuelle Noitom Hi5 [Source : www.hi5vrglove.com] équipé du Vive Tracker (encadré en rouge)

gants pour visualiser les mains permet au compagnon de se repérer dans l'espace et de prendre la barre à mine plus facilement. Cela permet une interaction plus fluide, plus réaliste et plus naturelle, surtout pour une population qui est très peu à l'aise avec la technologie.

Virtual Compagnon ayant pour objectif de former à la posture, il était important de pouvoir visualiser le compagnon en action et de capter ces gestes pendant l'exercice. Pour cela, il faut utiliser un système de capture de mouvement. Dans notre cas, nous avons testé deux systèmes différents : Le système « VICON » et les capteurs « Captiv ».

4.2.4 Capture de mouvement

Virtual Compagnon peut répondre à une instance du modèle de formation établi précédemment. En effet, elle intègre une fonction qui peut répondre à un besoin d'un profil en particulier : l'ergonome (Fig. 4.16).

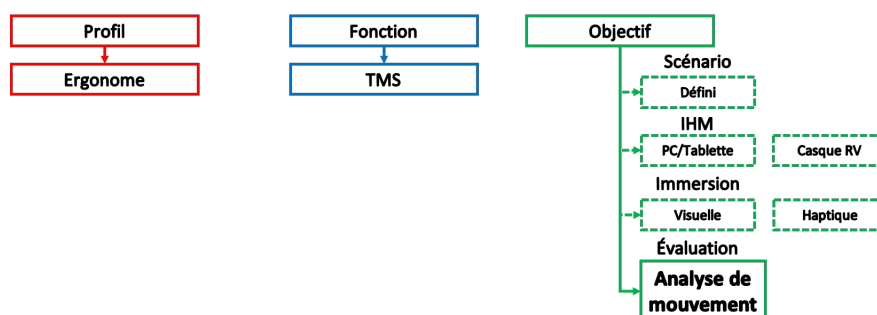


FIGURE 4.16: Instance du modèle de *Virtual Compagnon* – Ergonome

Ainsi, nous souhaitons intégrer dans *Virtual Compagnon* une fonction de capture de mouvement.

La capture de mouvement (ou Motion Capture – *MoCap*) est une technique qui permet de suivre la position ou l'orientation d'un objet ou d'une personne. Cette captation est restituée en temps réel via le moteur de rendu propre au matériel et

peut être enregistrée sous un format exploitable par des logiciels de 3D. Les différents matériels disponibles sur le marché permettent de capturer les mouvements du corps, les expressions faciales, le mouvement des doigts. . . .

Les techniques de capture de mouvement peuvent être classées en quatre catégories : optiques, mécaniques, magnétiques et gyroscopiques. Dans notre cas, nous avons comparé deux technologies différentes.

VICON

C'est un système de capture de mouvement optique. Pour l'utiliser, on pose sur l'objet ou la personne qu'on souhaite suivre, des marqueurs à certains endroits. Pour le suivi des mouvements du corps, ces marqueurs sont placés près des articulations (Fig. 4.17a).

Pour capter ces points, des caméras infrarouge sont utilisées (Fig. 4.17b). Les caméras envoient des rayons infrarouges qui sont réfléchis par les marqueurs à ces mêmes caméras. Les coordonnées des points sont déduits par triangulation. Il faut un minimum de deux caméras au logiciel pour les déduire.



(a) Les marqueurs utilisés par les systèmes optiques de capture de mouvement



(b) Caméra infrarouge utilisée pour les systèmes optiques de capture de mouvement

FIGURE 4.17: Composantes du système VICON [Source : www.vicon.com]

Ainsi, lorsqu'un point est visible, il apparaît sur le logiciel de traitement sous la forme

de pixel éclairé par rapport à l'arrière plan. Chaque point a un identifiant unique, qui pourra être utilisé en post-traitement pour reconnaître les différentes parties du corps. Il est possible ainsi de reconstituer le squelette en formant un axe reliant les points.

Captiv

C'est une solution logicielle et matérielle développée par « Tech Ergo Appliquées » (TEA) et utilisée chez Bouygues Construction. La solution est utilisée pour l'analyse de poste de travail en situation réelle d'activité grâce à des capteurs sans fils placés directement sur le corps du sujet observé (Fig. 4.18a). Un boîtier externe permet la synchronisation et l'enregistrement des données (Fig. 4.18b).



(a) Le capteur T-Sens Motion de TEA



(b) Le T-Log de TEA

FIGURE 4.18: La solution matérielle développée par TEA [Source : www.teaergo.com]

La solution logicielle (Fig. 4.19) permet également d'appliquer les données récoltées à un avatar pour que l'analyse soit plus visuelle. Un certain nombre d'outils est aussi disponible pour une analyse quantitative du mouvement.

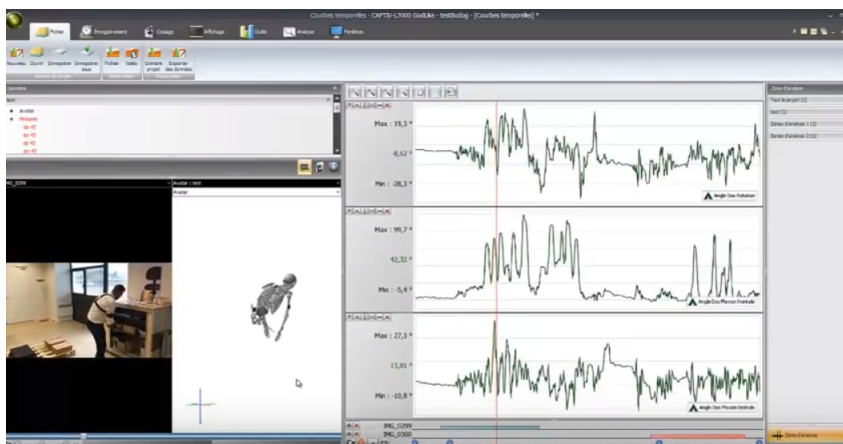


FIGURE 4.19: Solution logicielle développée par TEA [Source : www.teaergo.com]

Comparatif Captiv et Vicon

Nous avons fait le choix d'utiliser deux solutions de capture de mouvement et nous souhaitons en évaluer l'usage.

Tout d’abord, l’avantage de la solution Captiv est sa mobilité. La solution est utilisable en intérieur comme en extérieur. De plus, elle ne nécessite pas d’installation fixe, comme le Vicon avec ses caméras.

En ce qui concerne l’installation, le Vicon est plus simple à installer. En effet, il suffit de placer les marqueurs sur les parties du corps que l’on souhaite suivre. Une fois placés, chaque marqueur doit être repéré par au moins trois caméras pour être identifié.

La solution Captiv quant à elle, est plus lourde à mettre en place. Il faut, en effet, procéder à une calibration initiale des capteurs. Ensuite, une fois placés sur la personne, il faut calibrer le « zéro ». Enfin, les capteurs doivent rester à une distance maximale de 2 m du T-Log pour ne pas perdre le signal.

La solution Vicon permet une visualisation en temps réel des mouvements, ce que ne permet pas la solution Captiv, qui elle opte pour un enregistrement des données et une visualisation en post-traitement. Cela dit, l’étude proposée par TEA est plus complète, et permet d’adapter les données à la morphologie de la personne testée et ainsi avoir une étude propre à chaque compagnon.

Comparatif des analyses

Nous avons mené des tests auprès de plusieurs participants. Ces expériences seront détaillées dans le chapitre 5.

L’objectif est d’étudier l’usage des deux solutions et de les évaluer auprès des ergonomes. Nous avons donc enregistré les mouvements des participants pendant l’accomplissement de la tâche durant les sessions. Nous avons utilisé les deux systèmes en simultané en plaçant les capteurs sur les participants comme indiqué sur la figure (Fig. 4.20).

Nous avons enregistré les mouvements de la personne pendant l’accomplissement de la tâche sur la plateforme.

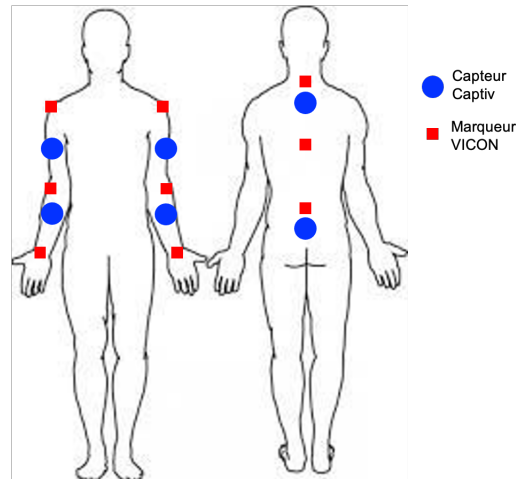
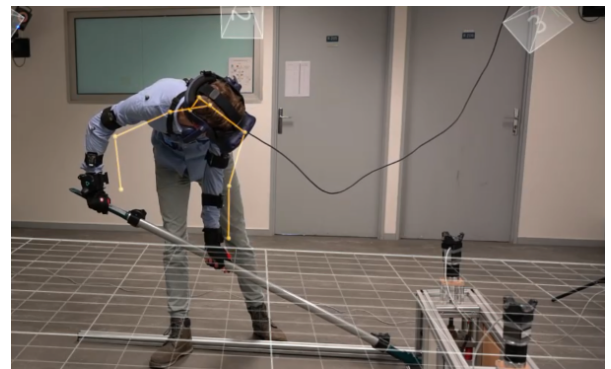


FIGURE 4.20: Placement des capteurs de suivi de mouvement – En rouge, les marqueurs du VICON, en bleu, les capteurs Captiv

Sur le système VICON, nous avons pu observer en temps réel les gestes effectués (Fig. 4.21), grâce au divers marqueurs placés sur le haut du corps.



(a) Position haute



(b) Position basse

FIGURE 4.21: Suivi du mouvement grâce au Vicon – Superposition des membres du participants et des segments ; en jaune, du VICON

Nous pouvons remarquer qu'il est possible de reconstituer assez simplement les membres supérieurs d'un utilisateur équipé des marqueurs et suivre ses mouvements en temps réel.

Nous avons extrait les données générés par le logiciel du VICON et nous avons tracé les trajectoires stockées dans le fichier de données du VICON (Fig. 4.22), en utilisant le langage de programmation « *R* » [R Core Team, 2017]. Nous avons utilisé la librairie « *Plotly* » [Plotly Technologies Inc., 2015] de *R*.

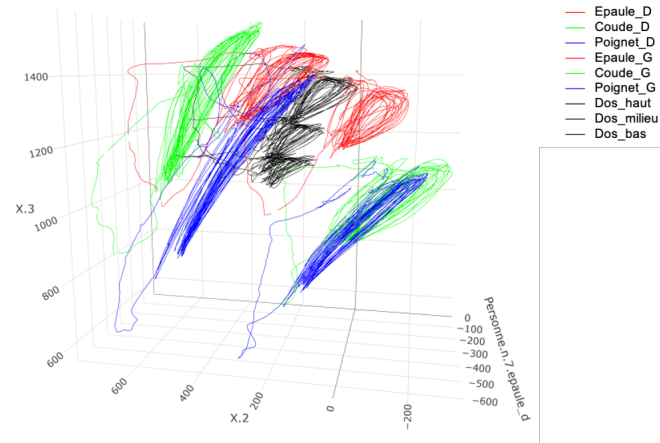


FIGURE 4.22: Représentation des trajectoires enregistrées par le VICON

Nous avons calculé ensuite le centre de gravité pour chaque ensemble (Fig. 4.23).

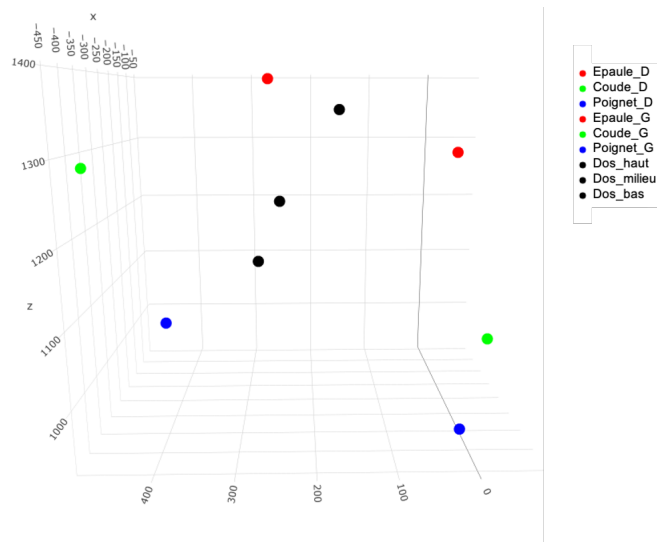


FIGURE 4.23: Centre de gravité des trajectoires des marqueurs

En reliant tous les points entre autres, nous retrouvons bien la représentation des membres supérieurs de l'utilisateur (Fig. 4.24).

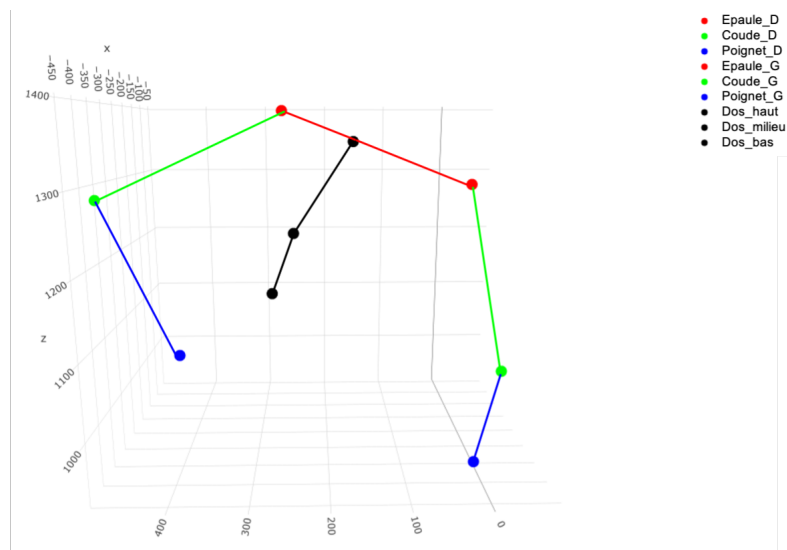


FIGURE 4.24: Représentation du squelette des membres supérieurs à partir des centres de gravité des trajectoires des marqueurs

L'utilisation du VICON, bien que simple, nécessite l'intervention d'un ergonome pour interpréter les résultats.

Sur Captiv, nous pouvons voir en post-traitement sur un avatar, les différentes parties du corps qui se retrouvent, ou pas, contraintes. Un code couleur est choisi pour définir le niveau de contrainte (vert – peu sollicité, orange – moyennement sollicité et rouge – très sollicité) (Fig. 4.25).



FIGURE 4.25: Analyse visuelle proposée par le logiciel Captiv à partir des données enregistrées sur le T-Log

La solution logicielle de TEA permet également d'obtenir une synthèse de l'expérience. On obtient ainsi, sur l'ensemble de la session, une description quantitative des flexion, extension et rotation des différentes parties intégrées dans l'étude (Fig. 4.26)

Ceci permet aux ergonomes d'avoir une étude complète et basées sur des données médicales.

Les deux solutions ont été validées et fonctionnent avec la plateforme. Elles

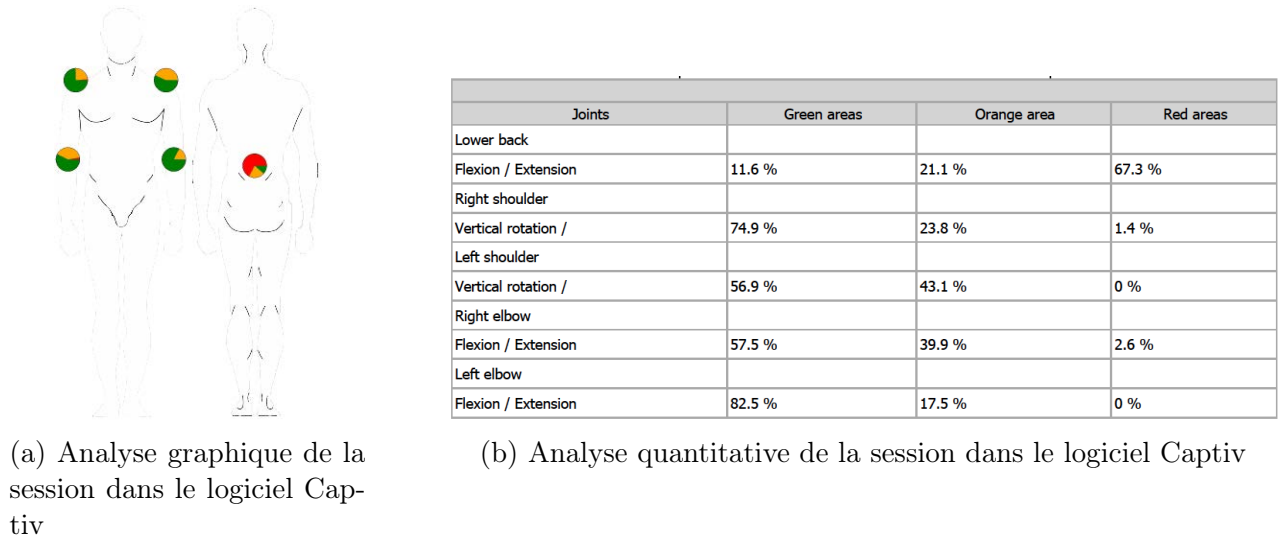


FIGURE 4.26: Analyse descriptive de la session dans le logiciel Captiv

apportent une réponse au besoin de l'ergonome. Captiv permet une analyse complète. Vicon permet de visualiser les gestes du compagnon et apporter des recommandations.

Dans ce chapitre, nous avons développé les différentes parties composant le simulateur *Virtual Compagnon*. La plateforme permet de restituer l'effort lors de la manipulation d'une banche avec l'outil réel, la barre à mine instrumentée. La partie virtuelle permet l'immersion, et la fonction de capture de mouvement qui permet d'analyser, en temps réel, le mouvement du compagnon. Cette dernière partie ne sera pas prise en compte dans la suite.

Virtual Compagnon permet ainsi de scénariser des séances de formations en permettant au formateur d'adapter le contenu en fonction du niveau du compagnon. La plateforme permet au compagnon une immersion visuelle et haptique et une interaction avec l'outil qu'il utilise sur chantier. Enfin, le système de capture de mouvement permet aux ergonomes d'analyser les gestes lors de l'utilisation de la barre à mine et ainsi accompagner les compagnons dans la compréhension des risques d'une utilisation inappropriée de l'outil.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons l'expérimentation que nous avons mis en place afin d'évaluer l'acceptation de la solution et la compréhension des risques liés à la mise en œuvre de la banche, par deux populations différentes : des novices et des professionnels. Nous décrirons la procédure mise en place, analyserons les résultats et conclurons sur notre étude.

Chapitre 5

Évaluation des apports pour un nouvel outil de formation

Sommaire

5.1	Le contexte	114
5.2	Expérimentation : Contrôle des connaissances	114
5.2.1	Objectif du questionnaire	115
5.2.2	Procédure d'évaluation	116
5.2.3	Protocole	117
5.3	Résultats du test	118
5.3.1	Analyse des réponses au questionnaire complet	119
5.3.2	Verbatim	126
5.3.3	Conclusions de l'étude	129
5.3.4	Perspectives de l'étude	130

Dans le chapitre précédent, nous avons définis les spécifications fonctionnelles et techniques de *Virtual Compagnon*. La plateforme est dédiée à la sensibilisation et à la formation au bon geste et à la bonne posture lors de l'utilisation de la barre à mine lors de la mise en œuvre de la banche.

Dans ce chapitre, nous décrirons les expérimentations que nous avons mis en place afin d'étudier l'intérêt de l'utilisation de la robotique et de la RV dans la formation au geste du coffreur-bancheur et d'étudier l'acceptation de la solution. Nous interpréterons les résultats obtenus. Enfin, nous conclurons sur notre étude et proposerons les axes d'amélioration possibles.

5.1 Le contexte

Comme expliqué dans le chapitre 3, la banche est un outil fréquemment utilisé sur le chantier. Le mode opératoire de mise en oeuvre de la banche comporte plusieurs étapes. Ces étapes présentent toutes un risque sur la santé et la sécurité du compagnon. Nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la barre à mine pour la fermeture de la banche.

Dans un premier temps, nous avons proposé une version dédiée à la formation uniquement basée sur une immersion visuelle avec des manettes pour l'interaction. Les retours ont montré les limites par les compagnons.

Nous avons donc développé *Virtual Compagnon* présenté dans le chapitre 4. *Virtual Compagnon* est un système alliant plateforme robotique et RV pour la formation à l'utilisation de la barre à mine pour l'ajustement d'un voile, un autre processus du mode opératoire lié à la banche. La question d'inclure un retour haptique en utilisant un outil des compagnons doit être évaluée.

Pour évaluer le système que nous avons développé, nous avons mené des tests auprès de deux types de populations différentes. Dans la suite, nous décrirons la procédure mise en place et nous présenterons et discuterons les résultats.

5.2 Expérimentation : Contrôle des connaissances

Nous souhaitons mesurer l'apport de *Virtual Compagnon* avec ses fonctions dans l'apprentissage et l'acquisition des connaissances de l'utilisation de la barre à mine pour la fermeture du voile de banche.

Pour cela, nous avons mis en place un test reprenant le format de formation classique (une session théorique et une session pratique) et nous y avons inclus la session basée sur l'utilisation de la RV. Un questionnaire a été mis en place afin d'évaluer l'apport pour des utilisateurs n'ayant aucune expérience (novices) et des utilisateurs ayant une bonne pratique de l'outil (professionnels).

Pour les novices, l'intérêt est de savoir si l'utilisation d'un tel outil est pertinente pour l'apprentissage de la méthodologie, du risque et du bon geste. Pour les professionnels, nous souhaitons mettre en place un moyen pour évaluer les connaissances des bancheurs, leur apporter un nouveau moyen de sensibilisation et de formation aux gestes. C'est aussi un outil destiné aux formateurs pour apporter des métriques à la formation actuelle.

Pour ce faire, notre objectif est de procéder à une évaluation basée sur l'analyse de leur connaissances sur la banche et son usage. Cette évaluation est basée sur des

questions sur les outils (la banche et la barre à mine) et sur les risques liés à leur utilisation afin d'évaluer l'apport de la formation à travers plusieurs modalités : depuis la vidéo simple, jusqu'à la RV associée à une plateforme robotique assurant un retour de force.

Les questions porteront sur deux thèmes : les connaissances générales et les connaissances en matière de risques liés à l'utilisation de la banche et de la barre à mine.

- Les connaissances générales portent sur l'usage et les dimensions des outils (la banche et la barre à mine).
- Les connaissances en matières de risques sont liés à la connaissance des risques associées à l'utilisation de ces outils.

Notre évaluation sera basée sur une notation des questions.

5.2.1 Objectif du questionnaire

Nous avons rédigé un questionnaire en deux langues : en français et en anglais (Annexe A). Le questionnaire comporte quinze questions et une section, à la fin, dédiée aux commentaires. Les participants sont invités en fin de session, à apporter leurs commentaires. Les questions pouvaient comporter une ou plusieurs réponses possibles.

Les questions sont notées. Un barème est mis en place. Ce barème correspond au nombre de réponses possibles. C'est-à-dire que si une question a deux réponses possibles, elle sera notée sur deux. Si le participant ne coche qu'une réponse sur les deux, il aura un point. Le questionnaire est noté sur 55 points.

Sur les quinze questions, cinq sont considérées comme questions principales. Il s'agit de questions orientées vers la compréhension de l'impact de la tâche sur la santé du compagnon.

Les dix autres questions sont considérées comme des questions secondaires. Elles concernent les caractéristiques de la banche et de la barre à mine.

Nous avons découpé notre questionnaire en deux parties : les questions principales et les questions secondaires.

Les questions principales concernent les risques sur la santé lors de l'utilisation de la barre à mine pour l'ajustement de la banche.

Les questions secondaires concernent, quant à elles, des informations relatives à la banche et à la barre à mine comme le poids ou les dimensions.

Dans la suite, nous présenterons la procédure mise en place pour l'expérimentation.

5.2.2 Procédure d'évaluation

Pour évaluer l'apport de différents outils en matière de formation, nous avons rédigé un questionnaire que nous faisons passer quatre fois utilisant trois différents supports d'information (Fig. 5.1).

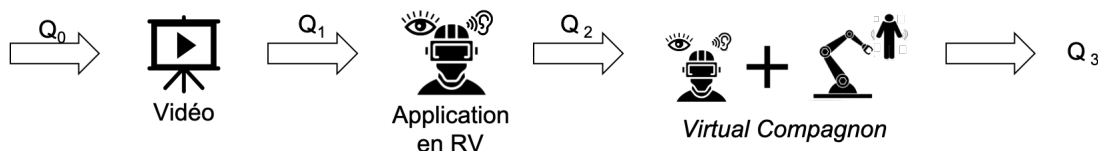


FIGURE 5.1: Procédure suivie pour l'expérimentation – Protocole Bouygues Construction

Les différents supports d'information sont décrits dans la suite.

Q₀ Le premier questionnaire est proposé aux participants dès leur arrivée. Ce questionnaire permet d'évaluer les connaissances de base pour chaque personne.

Q₁ Une fois le premier questionnaire terminé, une courte vidéo de la banche est proposée aux participants. La vidéo montre les différentes étapes de montage de la banche avec les différents outils utilisés. On y voit deux compagnons effectuant les différents gestes du dépliage à la fermeture du voile en passant par l'élingage et la mise en place. Le deuxième questionnaire est proposé à la fin de la vidéo.

Q₂ Cette étape du test comprend le suivi de posture du participant. À son arrivée, il est équipé des capteurs Captiv. Seuls les participants novices ont été équipés en plus des marqueurs pour le VICON, étant donné que le système y est installé. Ils sont ensuite équipés des gants Noitom Hi5 et du casque de RV HTC Vive et des manettes. Un texte court leur est ensuite proposé (Annexe A.2.1). Ce texte explique l'objectif de l'exercice et les différentes interactions avec les boutons. Ils manipulent ainsi une barre à mine virtuelle et déplacent la banche. L'exercice est arrêté au bout de deux minutes. Ils répondent ensuite au troisième questionnaire.

Q₃ Cette étape comprend, comme la précédente, le suivi de posture. Un autre texte est proposé aux participants (Annexe A.2.1). Il précise les étapes d'utilisation de la barre à mine réelle et son placement dans le système robotique. Une fois équipés du casque, les mouvements des participants sont suivis pendant deux minutes. Ils répondent au dernier questionnaire à la fin de la manipulation et sont invités à noter leurs commentaires.

5.2.3 Protocole

Le protocole s'inscrit dans la procédure de formation de Bouygues Construction.

Nous avons fait passer une série de questionnaires à deux groupes : un groupe de novices (quinze personnes) et un groupe de professionnels (dix personnes).

Les novices ont participé au test en laboratoire (Fig. 5.2).



FIGURE 5.2: Un participant en cours de test sur la plateforme au sein du laboratoire

Ils n'ont aucune connaissance du milieu du BTP et n'ont jamais utilisé la banche ou la barre à mine. Leurs caractéristiques sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.1).

TABLE 5.1: Caractéristiques des participants du groupe des novices

Participant	Sexe	Âge
1	H	25
2	F	26
3	H	34
4	H	42
5	H	26
6	H	26
7	H	25
8	H	27
9	F	20
10	F	46
11	H	47
12	F	17
13	H	25
14	H	27
15	F	42

Les professionnels, tous de sexe masculin, sont des stagiaires du CFA Gustave Eiffel (Fig. 5.3). Le test a été mené au sein du CFA, au cours de leur formation. Ils connaissent



FIGURE 5.3: Un compagnon en cours de test sur la plateforme au CFA

le chantier et ont, pour la plupart, pratiqué la banche. Leurs caractéristiques sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.2).

TABLE 5.2: Caractéristiques des participants du groupe des professionnels

Participant	Âge	Expérience sur chantier (mois)
1	44	3
2	27	3
3	52	3
4	41	3
5	42	3
6	47	3
7	28	3
8	21	3
9	22	3
10	27	3

5.3 Résultats du test

Nous avons mené trois études différentes : une étude sur le questionnaire complet, une étude portant uniquement sur les questions principales et une étude portant uniquement sur les questions secondaires.

Pour chaque étude, deux paramètres ont été étudiés. D'un côté, nous avons regardé les moyennes pour chaque groupe. De l'autre, nous avons regardé les gains.

Les gains correspondent à la différence de score entre les sessions, c'est-à-dire ($Q_n - Q_{n-1}$). Cela nous sert à observer s'il existe une amélioration du score d'une session à une autre, en fonction des outils proposés.

Dans la suite, nous présenterons l'analyse du questionnaire complet. Une analyse

descriptive complète est fournie en annexe (Annexe B.4.1) Les analyses des questions principales et des questions secondaires sont présentées en annexe (Annexe B).

5.3.1 Analyse des réponses au questionnaire complet

Dans cette partie, la totalité du questionnaire a été prise en compte. Les réponses du participants ont été notées sur la base de 55 points. Chaque question était notée sur le nombre de bonnes réponses possibles.

L'analyse des moyennes et des gains est présentée dans la suite.

Les moyennes

Nous avons calculé la moyenne de tous les participants pour chaque session.

Pour le groupe de novices, les moyennes et écart-types des scores sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.3).

TABLE 5.3: Moyenne et écart-type du groupe des novices

Novices	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Moyenne	10,8	22,4	24,5	28,6
Écart-type	10	8,3	5	5,9

Pour les professionnels, les moyennes et écart-types des scores sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.4).

TABLE 5.4: Moyenne et écart-type du groupe des professionnels

Professionnels	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Moyenne	41,5	44,5	44,5	47,6
Écart-type	21,3	21,9	20,1	21

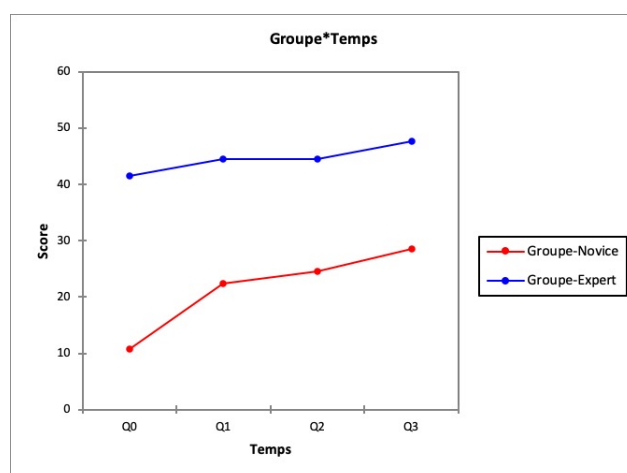
Pour comparer les groupes, une ANOVA à mesures répétées est appliquées en utilisant des modèles mixtes. La variable dépendante est le score. Les variables explicatives sont le temps (Q_n) et le facteur groupe (Novices et professionnels). Nous mesurons la significativité de l'interaction « groupe × temps » (Tab. 5.5).

La valeur trouvée ($p < 0,05$) montre que l'effet est significatif. Cela signifie que l'effet de la session n'est pas le même en fonction du groupe.

TABLE 5.5: Test de type III des effets fixes

Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Groupe	1	92	16,306	0,0001
Temps	3	92	38,468	<0,0001
<i>Groupe × Temps</i>	3	92	8,379	<0,0001

Nous devons donc mener l'étude sur chaque groupe séparément pour évaluer l'effet du temps (qui correspond à la session Q_n). Il y a un effet significatif de l'interaction *Groupe × Temps* ce qui signifie que l'effet de la session n'est pas le même en fonction des groupes (Fig 5.4).

**FIGURE 5.4:** Interaction *Groupe × Temps*

On analyse donc l'effet du temps sur chaque groupe séparément. Pour cela, nous vérifions le modèle.

La figure (Fig. 5.5) montre trois points extrêmes du groupe. Cela dit, le tracé suit la diagonale. On peut considérer les résidus comme étant approximativement gaussiens et que donc, les hypothèses du modèle sont vérifiées. Un test de normalité de Shapiro–Wilk rejette l'hypothèse que l'échantillon suit une loi normale ($p < 0,0001$) en raison de ces points.

On remarque que trois points sur la droite du schéma se démarquent du reste. Ces points correspondent à un sujet dont les résultats sont très bons. Il influence l'analyse car un test de Shapiro–Wilk sans eux n'est plus significatif ($p = 0,072$).

Pour analyser l'effet du temps sur chaque groupe séparément, nous appliquons, pour chaque groupe, une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes et si les conditions ne sont pas vérifiées nous appliquons un test de Friedman. La variable dépendante est le score. La variables explicative est le facteur temps.

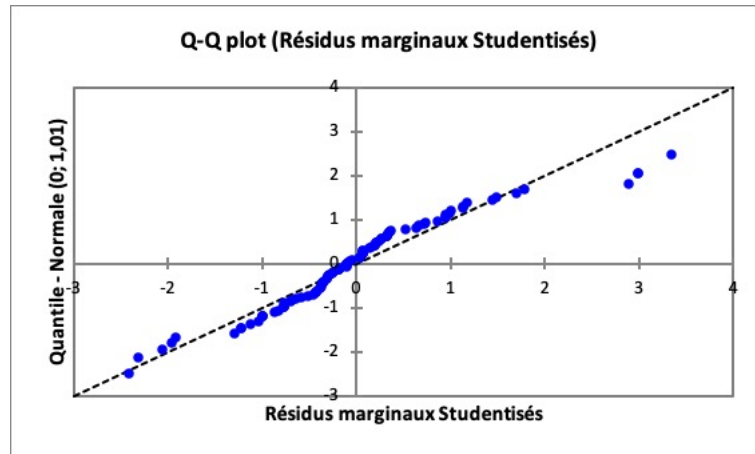


FIGURE 5.5: Tracé des résidus normalisés de Student – 3 points extrêmes sur la droite de la figure

Pour les novices, les résultats du test de Friedman sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.6). La différence entre les moyennes de sessions est significative ($p < 0,0001$).

TABLE 5.6: Test de Friedman pour le groupe des novices

Q (Valeur observée)	36,021
Q (Valeur critique)	7,815
p-value (bilatérale)	<0,0001
Alpha	0,05

Pour vérifier quelles moyennes sont différentes, nous appliquons les tests post-hoc de Nemenyi (Tab. 5.7). Seule Q_0 diffère significativement des autres sessions.

TABLE 5.7: p-values des tests post-hoc de Nemenyi

	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
Q_0	1	0,001	0,0003	0,0001
Q_1	0,001	1	0,777	0,013
Q_2	0,0003	0,777	1	0,028
Q_3	0,0001	0,013	0,028	1
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083				

Pour les professionnels, le modèle mixte est vérifié.

Nous appliquons un test de type III des effets fixes (Tab. 5.8).

TABLE 5.8: Test de type III des effets fixes

Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Temps	3	36	4,516	0,009

Pour observer quelles moyennes sont différentes, nous appliquons les tests post-hoc de Tuckey (HSD) (Tab. 5.9).

TABLE 5.9: Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%

Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
Q ₃ vs Q ₀	6,182	1,680	2,693	0,004	Oui
Q ₃ vs Q ₂	3,091	1,680	2,693	0,272	Non
Q ₂ vs Q ₁	3,091	1,680	2,693	0,272	Non
Q ₂ vs Q ₀	3,091	1,680	2,693	0,272	Non
Q ₂ vs Q ₁	0,000	1,680	2,693	1,000	Non
Q ₁ vs Q ₀	3,091	1,680	2,693	0,272	Non
Valeur critique du d de Tukey : 3,809					

La seule différence significative est entre Q₀ et Q₃. On retrouve ce résultat avec un test de Friedman (Tab. 5.10).

TABLE 5.10: p-values trouvées par le test de Friedman

	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	1	0,083	0,299	0,006
Q ₁	0,083	1	0,488	0,299
Q ₂	0,299	0,488	1	0,083
Q ₃	0,006	0,299	0,083	1
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083				

On peut ainsi dire, comme hypothèse, que l'outil 3 (plateforme robotique associée à la RV) apporte plus d'informations aux professionnels qu'une vidéo ou l'application RV toute seule.

Nous analysons dans la suite les gains entre chaque session pour affiner notre évaluation.

Les gains

Afin de respecter la procédure de formation, l'ordre de passation des supports n'a pas été randomisé. Nous allons donc étudier un effet cumulatif. Ainsi on peut mesurer avec Q₁ l'effet de l'outil 1 par rapport à Q₀, avec Q₂ l'effet par rapport à Q₁ de l'outil 2 etc. . . .

Pour chaque sujet, l'effet d'un outil donné sera déterminé par la différence de score entre la session précédent l'outil et la session suivant l'outil utilisé. Ainsi, l'effet de l'outil 2 sera obtenu en calculant la différence entre le score à Q_1 et le score à Q_2 . C'est le gain entre chaque session.

Les moyennes et écart-types des gains de $Q_n - Q_{n-1}$ sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.11).

TABLE 5.11: Moyenne et écart-type des gains $Q_n - Q_{n-1}$ du groupe des novices

Novices	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
Moyenne	12,5	1,8	4,8
Écart-type	6,9	5,3	3,7

Les moyennes et écart-types des gains de $Q_n - Q_{n-1}$ sont rapportés dans le tableau (Tab. 5.12).

TABLE 5.12: Moyenne et écart-type des gains $Q_n - Q_{n-1}$ du groupe des professionnels

Professionnels	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
Moyenne	3,1	0	3,1
Écart-type	6,4	5,6	4,4

Afin d'analyser les gains entre les sessions, nous appliquons une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes. La variable dépendante est le gain entre deux sessions successives. La variable dépendante est le score. Les variables explicatives sont le temps (Q_n) et le facteur groupe (Novices et professionnels). Nous mesurons la significativité de l'interaction « groupe \times temps » (Tab. 5.13).

TABLE 5.13: Test de type III des effets fixes

Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Groupe	1	69	11,756	0,001
Temps	2	69	8,857	0,0004
<i>Groupe \times Temps</i>	2	69	2,816	0,067

Il n'y a pas d'effet d'interaction *Groupe \times Temps*. Cela dit, nous remarquons deux choses : il existe un effet de groupe ($p < 0,05$). Cela signifie que les gains diffèrent entre les groupes.

Il existe également un effet de temps ($p < 0,05$). Les gains diffèrent en fonction des sessions.

TABLE 5.14: Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%

Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
Novices vs Professionnels	3,879	1,189	1,995	0,002	Oui
Valeur critique du d de Tukey : 2,821					

Pour observer les différences deux à deux des gains en fonction des groupes, nous appliquons les tests post-hoc de Tuckey (HSD) (Tab. 5.14).

Une analyses des différences montre que les gains du groupe des « novices » sont supérieurs en moyenne à ceux du groupe des « professionnels ». Cela s’explique par le fait que les groupes des novices n’ont aucune connaissance du chantier, au début du test, et donc apprennent plus de choses à chaque fois qu’un nouvel outil est ajouté.

Pour observer les différences deux à deux des gains en fonction des groupes, nous appliquons les tests post-hoc de Tuckey (HSD) (Tab. 5.15).

TABLE 5.15: Analyse des différences entre les modalités

Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
Q_1-Q_0 vs Q_2-Q_1	6,333	1,457	2,396	0,000	Oui
Q_1-Q_0 vs Q_3-Q_2	3,758	1,457	2,396	0,032	Oui
Q_2-Q_2 vs Q_2-Q_1	2,576	1,457	2,396	0,188	Non
Valeur critique du d de Tukey : 3,388					

On observe que le gains Q_1-Q_0 diffèrent significativement de Q_2-Q_1 et Q_3-Q_2 . Cela peut s’expliquer par le fait que le gain de la session 1 par rapport à la session 0 est plus important que les gains entre les autres sessions, dû à l’apprentissage et au plafonnement des scores. Une forme de convergence de l’apprentissage.

D’après le tableau 5.13, l’interaction « groupe \times temps » n’est pas significative mais proche de 0,05 ($p = 0,067$). Pour compléter l’étude, nous séparons les groupes.

Pour analyser l’effet du temps sur chaque groupe séparément, nous appliquons, pour chaque groupe, un test de Friedman.

Pour les groupes des novices, les résultats sont reportés dans le tableau (Tab. 5.16).

TABLE 5.16: Test de Friedman pour le groupe des novices

Q (Valeur observée)	17,517
Q (Valeur critique)	5,991
p-value (bilatérale)	<0,0001
Alpha	0,05

Nous appliquons les tests post-hoc de Nemenyi pour observer quels gains moyens sont différents (Tab 5.17).

TABLE 5.17: p-values calculées par les tests post-hoc de Nemenyi

	Q_1-Q_0	Q_2-Q_1	Q_3-Q_2
Q_1-Q_0	1	0,0003	0,001
Q_2-Q_1	0,0003	1	0,855
Q_3-Q_2	0,001	0,855	1
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0167			

Pour les novices, la différence entre les gains moyens de sessions diffère significativement ($p < 0,05$). C'est encore une fois Q_1-Q_0 qui diffère significativement de Q_2-Q_1 et de Q_3-Q_2 . En effet, n'ayant aucune connaissance du monde de la construction, les novices acquièrent un certain savoir dès le passage du premier outil. Dans la suite, ils ne font que capitaliser sur ce savoir et ajouter des éléments de réponses en fonction des outils présentés par la suite.

Nous appliquons le test de Friedman pour les professionnels (Tab.5.18)

TABLE 5.18: Test de Friedman pour le groupe des professionnels

Q (Valeur observée)	2,737
Q (Valeur critique)	5,991
p-value (bilatérale)	0,272
Alpha	0,05

Le test de Friedman nous montre qu'il n'existe pas de différence significative pour les groupes des professionnels ($p < 0,05$). On ne peut donc pas conclure sur l'apport des outils proposés.

Nous avons également recueilli les retours des participants par écrit, en leur demandant de répondre à la dernière question du questionnaire, à la fin de l'expérimentation.

5.3.2 Verbatim

En plus de répondre aux questions, nous avons demandé aux participants de commenter l'expérimentation. Ils pouvaient ainsi exprimer leurs ressentis et de suggérer des améliorations.

Novices

Une synthèse des différents retours des novices ont été reportés dans le tableau 5.19.

TABLE 5.19: Synthèse des retours des novices sur l'expérimentation

Points positifs	Points négatifs
<ul style="list-style-type: none"> — Bonne expérience, je ne connaissais pas la construction ni la banche, maintenant j'en sais un peu plus — L'expérience était très bien, j'ai appris beaucoup de choses — C'était bluffant. L'environnement virtuel est bien immersif — On ressent bien l'effort quand on utilise la barre à mine — J'ai compris comment utiliser la barre à mine dans la vidéo, et j'ai appris comment le faire en l'utilisant par moi-même — Bonne progression dans le didacticiel — Excellente expérience virtuelle pour comprendre les muscles les plus sollicités — On comprend bien les risques liés à la manipulation de la banche lors de la dernière étape 	<ul style="list-style-type: none"> — Rajouter des éléments représentatifs pour pouvoir se rendre compte des dimensions de la banche réelle — Il manque des explications pour répondre à la première question — La taille de mes mains en réalité virtuelle était plus petite qu'en réalité — La vidéo manquait d'informations — Quelques bugs lors de l'expérience

Les participants novices s'accordent tous à dire que l'expérimentation leur a permis de mieux comprendre le contexte de chantier. Ils ont apprécié l'EV et l'ont trouvé immersif. La progression dans l'expérience a été appréciée. Elle a permis de comprendre le contexte, de pratiquer en virtuel et s'exercer avec l'outil réel ensuite. Cette dernière phase a également été bien accueillie. Les participants ont pu comprendre les risques associés à l'utilisation de la banche et de la barre à mine. Ils ont ressenti l'effort nécessaire pour la déployer et les muscles qui sont sollicités pour y parvenir.

Bien que l'expérience fut bien appréciée, quelques points d'améliorations ont été suggérés par les participants. En effet, la vidéo proposée ne convient pas à un public novice car elle manque d'informations. Les novices ne connaissant pas le terrain avaient également du mal à se projeter et se rendre compte des dimensions des banches. Ils auraient souhaité avoir des éléments de comparaison pour pouvoir répondre à certaines questions. Enfin, nous avons rencontré quelques problèmes avec la capture de mouvement VICON notamment avec les marqueurs qui ne tenaient pas en place.

Professionnels

Les différents retours des professionnels ont été reportés dans le tableau 5.20.

TABLE 5.20: Synthèse des retours des professionnels sur l'expérimentation

Points positifs	Points négatifs
<ul style="list-style-type: none"> — J'ai compris la tâche en regardant la vidéo, car sur le terrain je n'ai pas beaucoup pratiqué la banche — Je me suis mieux rendu compte du risque sur le dos et les bras quand j'ai essayé la plateforme — Le jeu est bien. On aurait dit un vrai chantier — L'expérience avec la plateforme et la barre à mine est mieux qu'avec la manette — C'est bien parce que c'est fait pour préserver notre santé 	<ul style="list-style-type: none"> — Questionnaire répétitif — La vidéo ne donne pas toutes les informations — Le premier jeu (Expérience RV) est un peu compliqué, on ne comprend pas tout de suite comment faire

L'expérience immersive a été bien accueillie par les professionnels. Ils ont surtout apprécié l'immersion que le casque offre. Pour la plupart, ils n'ont jamais essayé de casque de RV. C'était pour eux une découverte de la technologie. Ils ont eu du mal avec l'expérience en RV uniquement. Ils n'étaient pas habitués à utiliser les manettes et un petit temps d'adaptation fut nécessaire, malgré le texte explicatif qu'ils ont lu. Pour ceux qui ont très peu pratiqué la banche sur le terrain, la vidéo leur a permis de comprendre la procédure liée à la mise en œuvre de la banche. Cela dit, certains disent que la vidéo ne fut pas complète et elle les aurait très peu aidé dans la compréhension de certains aspects permettant de répondre aux questions. L'expérience alliant la RV et la plateforme robotique a été bien appréciée. Ils ont pu constater que cela reprenait bien le geste qu'ils effectuent sur le chantier face à la banche. Cela leur a également permis de prendre du recul sur les risques liés à l'utilisation de la barre à mine. Étant concentré

sur leurs tâches sur le chantier et contraint par la cadence de la journée, ils n'ont pas le temps de se poser la question quant à l'impact d'une mauvaise posture ou d'un mauvais geste sur leur santé.

L'expérimentation a globalement plu aux professionnels. Ils saluent les efforts mis en place par l'entreprise pour préserver leur santé et leur éviter les risques d'accidents ou de maladies professionnelles. Un participant nous a, cela dit, signalé que le questionnaire se répétait et qu'il était ennuyé de répondre aux mêmes questions à chaque fois.

Discussion sur les résultats

Sur la totalité du questionnaire, les moyennes et les gains moyens sont différents (Tab. 5.21).

TABLE 5.21: Tableau récapitulatif des moyennes et écart-types de chaque groupe pour chaque session

Groupe	Moyenne (écart-type) Gain moyen (écart-type)			
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Novices	10,8 (10)	22,4 (8,3) +12,5 (6,9)	24,5 (5) +1,8 (5,3)	28,6 (5,9) +4,8 (3,7)
Professionnels	41,5 (21,3)	44,5 (21,9) +3,1 (6,4)	44,5 (20,1) 0 (5,6)	47,6 (21) +3,1 (4,4)

On remarque que pour les novices, le gain moyen le plus élevé est entre Q₀ et Q₁. L'outil 1 (la vidéo) a un grand effet moyen sur l'apprentissage. En effet, les novices découvrent des informations qu'ils ne connaissaient pas, grâce au premier outil. Même si les effets moyens des outils ajoutés par la suite sont faibles, on remarque que l'effet du troisième outil (RV associée à la plateforme à retour de force) est plus important que la RV toute seule. Cette faible variabilité s'explique par le plafonnement des scores entre les deux derniers questionnaires.

Le score moyen maximal n'est pas très élevé. Ceci s'explique par le manque de connaissance des novices des chantiers et des outils utilisés dans le BTP. Il existe une différence significative du score moyen à Q₀ avec Q₁, Q₂ et Q₃ mais pas entre les autres sessions. Cela s'explique encore une fois par l'apport significatif de l'outil 1 dans l'apprentissage.

Cela dit, tous les supports utilisés contribuent à la formation des novices. Ces outils permettent aux participants sans connaissance préalable d'apprendre directement le

contexte, la tâche à accomplir et les risques qui lui sont associés. La solution proposée peut donc être un bon outil de mise en situation en toute sécurité et de compréhension du contexte ainsi que les enjeux et les risques liés à la tâche étudiée ; la mise en œuvre de la banche grâce à la barre à mine.

Pour les professionnels, il y a peu d'effet moyen des outils. Il existe également une variabilité importante. Les professionnels qui ont participé au test n'ont pas tous le même degré de connaissances de la banche. Ils ne l'ont pas tous pratiqué au même niveau et il existe un écart dans le niveau de connaissances de base. Il existe une différence significative entre Q_0 et Q_3 mais pas entre les autres sessions. Le gain moyen cumulé est de 6,1/100. Bien que ce gain soit faible, on observe une amélioration dans les scores et surtout une acceptation de la solution et de la technologie par une population qui n'est pas habituée à utiliser le type de supports que nous avons proposé.

Nous avons observé un effet d'interaction groupe \times temps. Le gain de la session, et donc de l'apprentissage n'est pas le même entre les groupes. En effet, les gains du groupe des novices sont en moyenne supérieurs à ceux du groupe des professionnels. En moyenne, les gains Q_1-Q_0 diffèrent significativement de Q_2-Q_1 et de Q_3-Q_2 . Cela dit, une analyse séparée des groupes montre que ceci est pour le groupe des novices mais pas pour le groupe des experts. Ceci peut s'expliquer par le niveau de connaissances de départ qui diffère entre les deux groupes.

5.3.3 Conclusions de l'étude

Nous avons mis en place des tests sur *Virtual Compagnon* auprès de quinze novices et dix professionnels en formation au CFA Gustave Eiffel. Nous avons rédigé un questionnaire comportant quinze questions pour évaluer les connaissances des participants autour de la banche, de la barre à mine et des risques liés à leurs utilisations. Ce questionnaire a été présenté aux sujets en quatre temps. Hormis le premier questionnaire, tous les autres ont été précédés par un outil de formation : une vidéo, une application de RV et la plateforme *Virtual Compagnon*. L'ordre de présentation des outils n'a pas été randomisé pour respecter la procédure de formation mise en place ; une session théorique et une session pratique.

Nous avons analysé statistiquement les résultats obtenus et recueillis les retours des participants.

Nous avons ainsi constaté que chez les deux groupes, le gain étaient légèrement positif. On peut en conclure qu'il n'y a pas de rejet de la méthodologie. Nous avons pu mesurer une forme de performance. Le test nous a permis de classer les profils.

D'un côté, les novices, qui apprennent directement, dès les premiers supports. Ils comprennent le contexte et se familiarisent avec les procédures.

De l'autre, les professionnels ou les profils experts, qui ont des connaissances de base solides au départ, et qui auront moins de choses à apprendre. Cela dit, la méthodologie de formation leur permet de prendre du recul par rapport à leur façon de faire et prendre conscience de l'usure que peut provoquer leurs métiers.

L'étude nous a également permis de constater que peu importe la personne et peu importe son niveau de connaissance de base, la méthodologie lui permettra d'apprendre et de progresser, et ce indépendamment de l'outil par lequel il commence (Vidéo, RV, RV et plateforme robotique). Chaque outil fournit une information supplémentaire et complète les autres support de formation.

Les verbatims nous ont permis de constater l'intérêt du côté ludique de la formation. L'immersion assurée par la RV a permis aux professionnels d'adopter un comportement « naturel », car il se retrouvait dans un environnement qui lui est familier. L'intégration de la barre à mine, et donc un outil de chantier, a renforcé d'autant plus ce côté naturel observé dans le comportement des professionnels.

5.3.4 Perspectives de l'étude

Les premiers tests menés nous ont montré qu'il résulte, de la méthodologie, des gains constants mais faibles. Ces gains sont petits mais positifs. On peut en conclure que la méthode est validée par les participants et que notre population cible accepte la méthodologie et ne rejette pas les outils proposés. Cependant, il faut continuer l'étude. En effet, il serait intéressant de mener notre étude auprès d'un plus large panel d'utilisateurs et les suivre sur toute la durée de la formation. Pour les professionnels, le manque d'homogénéité dans les profils a pu influencer le déroulé du test. De plus, les professionnels qui ont participé n'ont pas beaucoup d'années d'expériences dans le bâtiment. Il serait intéressant de mener des expérimentations auprès de bancheurs confirmés.

Il serait également intéressant de reproduire l'expérience à plusieurs reprises échelonnées dans le temps. Cela nous permet de voir l'impact de l'outil *Virtual Compagnon* dans la sensibilisation aux risques liés à la tâche.

Dans le chapitre 4, nous avons vu que *Virtual Compagnon* est composé d'une fonction d'assistance. Dans nos premières expérimentations, nous n'avons pas exploité cet apport. Il serait intéressant d'étudier ces modes d'assistance et observer les comportements des participants. Cela permettra d'imaginer des scénarios de formation différents en fonction de l'individu. Le formateur serait ainsi capable de proposer un contenu de formation

adapté au niveau de connaissance de base des stagiaires. De plus, nous n'avons pas étudié les postures, composante importantes de notre méthodologie.

Il serait également intéressant de capitaliser sur l'expertise des coffreurs-bancheurs expérimentés afin d'alimenter le contenu de notre méthode. Cela permet de délivrer du contenu pertinent aux nouveaux profils qui intègrent l'entreprise.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

Le secteur de la construction figure parmi les secteurs comptant le plus d'accidents et de maladies professionnelles. Parmi les maladies professionnelles les plus présentes, les TMS figurent en tête de liste et sont les troubles les plus fréquents chez les compagnons.

La politique de prévention dans les entreprises du BTP s'articule autour d'un certain nombre de principes qui tendent à limiter les risques. La formation est un des piliers de ces préceptes.

La formation est l'un des moyens mis en place afin de sensibiliser et de former les compagnons de chantier aux risques liés à leurs métiers. Cela passe, dans un premier temps, par des sessions théoriques durant lesquels les consignes et les recommandations sont rappelés. Dans un second temps, la session pratique sert à mettre en pratique les acquis théoriques et à s'approprier les outils et les pratiques associées.

Néanmoins, mettre en place une formation demeure une procédure longue. Il faut mobiliser les compagnons, les déplacer et les héberger, identifier et réserver un lieu. Tout cela représente également un coût non négligeable. Il est donc intéressant de repenser la méthode de formation déjà en place, et apporter une solution afin de réduire les coûts.

Ces dernières années, de nouveaux formats de formations sont de plus en plus utilisés. Les MOOCs, les classes virtuels et les serious game se démocratisent grâce aux ordinateurs, aux smartphones et aux tablettes. Ces formats ont le mérite de proposer une approche plus ludique, plus engageante et plus motivante de la formation, avec, toujours, un objectif pédagogique précis.

L'un de ces formats est la réalité virtuelle. La RV est une technologie qui permet d'immerger une personne lambda dans un environnement généré par une machine. Nous

avons vu dans le chapitre 2 l'apport de la RV dans la formation dans les différents secteurs. Elle permet de former les salariés en les immergeant dans un environnement qui leur est familier. Les différentes interactions possibles permettent de reproduire différents cas d'usage en s'inspirant des modes opératoires réels. Elle permet également de sensibiliser aux risques des différents métiers dans un environnement contrôlé et en toute sécurité.

Cela dit, en matière de formation aux gestes et aux postures et de sensibilisation aux TMS, la RV reste insuffisante pour des professionnels car le sens du toucher et le retour de force n'y sont pas intégrés.

Ce travail de thèse propose de fournir un outil de sensibilisation et de formation aux risques. Nous avons choisi d'étudier l'utilisation de la barre à mine pour l'ajustement des banches. Une plateforme robotique et un environnement virtuel ont été proposés, accompagnés d'un système de suivi de posture afin d'accompagner les formateurs et les compagnons dans le processus de compréhension des risques liés à l'utilisation de la barre à mine.

Nous avons évalué, dans le chapitre 5, son usage, en marge de la crise de la COVID-19. Nous avons choisi d'évaluer, d'une part, l'impact de différents outils sur la formation de novices et de professionnels, et de l'autre, l'acceptation de cette méthodologie par une population de compagnons très peu habitués à utiliser de tels outils. Nous avons pu conclure que, malgré un manque de puissance statistique, que les scores des participants a progressé tout au long de la procédure suivie. Nous avons constaté également qu'il n'y a pas de rejet de la part des professionnels, ni de la méthodologie ni des outils mis à disposition, et surtout qu'ils étaient favorables à l'utilisation d'un tel équipement.

Cette étude met en évidence l'importance d'accompagner les compagnons dans la compréhension des risques liés à l'utilisation de la barre à mine pour l'ajustement des banches, mais aussi les risques liés à leurs métiers au sens large. Elle met également en évidence l'importance de mettre à disposition des formateurs, des outils permettant d'analyser efficacement le comportement des compagnons lors des formations, et de pouvoir analyser objectivement, qualitativement et quantitativement ce comportement, et d'individualiser ses recommandations et ses consignes.

6.2 Perspectives

Aujourd'hui, la plateforme *Virtual Compagnon* est passée du stade de POC (Proof of Concept) à prototype. Elle a été testée et acceptée par des compagnons. L'analyse du mouvement a été appréciée par les formateurs qui disposent maintenant d'un outil

d'évaluation objectif et quantitatif. Une nouvelle version doit être développée et sera intégrée à la future salle de réalité virtuelle de Bouygues Construction (deuxième version de la salle Arcas) et pourra être utilisée et testée par d'autres collaborateurs pour qu'ils prennent conscience des risques sur la santé du métier de banquier.

Afin d'augmenter sa robustesse, la plateforme robotique doit être améliorée. Les capteurs qui permettent de détecter la présence de la barre sont les plus sollicités et doivent donc être renforcés pour éviter toute dégradation du système électronique. La stabilité de la plateforme doit être également repensée pour éviter d'avoir à la fixer au sol, et ainsi permettre au formateur d'être mobile. Le système de suivi de posture doit également être pris en compte. La solution Vicon comme la solution Captiv sont toutes les deux de bons moyens d'analyse de posture mais il faut procéder à une évaluation spécifique. Il faut donc bien étudier l'emplacement des caméras pour la première solution, et trouver une meilleure solution pour le boîtier d'acquisition pour la deuxième.

Cette thèse met en perspective une proposition de méthodologie de formation basée sur la RV et une plateforme à retour de force pour l'apprentissage du geste pour un profil de compagnon. Il serait intéressant de généraliser ce principe à d'autres cas d'usage afin d'accompagner les formateurs, mais surtout les compagnons, dans la compréhension des efforts au niveau des corps, des différentes tâches de leur quotidien.

Cette approche pourrait également être un bon moyen pour accompagner les ergonomes lors des études, en intégrant les outils de RV dès la phase de conception, et éviter ainsi des coûts de production de maquettes et réduire les itérations de conception de preuves de concept.

Enfin, cette méthodologie pourrait contribuer à l'évolution des méthodes de formation. On pourrait utiliser la RV pour former des compagnons sur un chantier virtuel, qui serait une réplique exacte, à l'instant t , du chantier sur lequel ils sont. Le module de formation serait une sorte de « jumeau numérique » du chantier, et les compagnons pourraient se préparer en amont, à l'exécution de tâches complexes ou à risques.

Publications

Conférences internationales avec comité de relecture

- Trénoras, L., Yin, C. X., Hafsia, M., Monacelli, E., & Benali, A. (2019). Gyrolift, a new way of verticalisation on mobile personal transporter. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 90(April 2018), 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.10.011>
- Hafsia, M., Monacelli, E., & Martin, H. (2018). Virtual Reality Simulator for Construction workers. *Proceedings of the Virtual Reality International Conference – Laval Virtual on – VRIC '18*, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3234253.3234298>
- Hafsia, M., Monacelli, E., Rabreau, O., Dong, S., & Martin, H. (2018). Mixed Reality Simulator for Construction Workers ' Musculoskeletal Disorders Prevention. *Evolving Construction : Towards a Technological Revolution – CONVR 2018*.
- Hafsia, M., Ouarti, Y., Ducoulombier, L., Monacelli, E., & Martin, H. (2019). Assessing the cognitive load of a tower crane operator ' s workstation using Virtual reality and electroencephalography : A methodological Overview. *Enabling Digital Technologies to Sustain Construction Growth and Efficiency – CONVR 2019*.

Bibliographie

- [AGP, 2020] Art graphique et patrimoine. <http://www.artgp.fr/>, 2020.
- [Ahlberg *et al.*, 2007] Gunnar Ahlberg, Lars Enochsson, Anthony G. Gallagher, Leif Hedman, Christian Hogman, David A. McClusky, Stig Ramel, C. Daniel Smith, et Dag Arvidsson. Proficiency-based virtual reality training significantly reduces the error rate for residents during their first 10 laparoscopic cholecystectomies. *American Journal of Surgery*, 193(6) :797–804, 2007.
- [Ahmed et Sutton, 2017] Allam Ahmed et Michael J.D. Sutton. Gamification, serious games, simulations, and immersive learning environments in knowledge management initiatives. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 14(2/3) :78–83, apr 2017.
- [Alvarez *et al.*, 2012] Julian Alvarez, Damien Djaouti, et Olivier Rampnoux. *Introduction au Serious Game - Serious Game an Introduction (French and English)*. nov 2012.
- [Alvarez, 2007] Julian Alvarez. *Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle*. PhD thesis, Université Toulouse - Jean Jaurès, Toulouse, jan 2007.
- [Amundarain *et al.*, 2004] Aiert Amundarain, Diego Borro, Alex García-Alonso, Jorge Juan Gil, Luis Matey, et Joan Savall. Virtual reality for aircraft engines maintainability. *Mécanique & Industries*, 5(2) :121–127, mar 2004.
- [Azuma, 1997] Ronald T Azuma. A survey of augmented reality. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4) :355–385, 1997.
- [Beach, 1965] D S Beach. *Personnel : the Management of People at Work*. Macmillan, 2 édition, 1965.
- [Beckman, 1993] Brian C. Beckman. Virtual reality flight control display with six-degree-of-freedom controller and spherical orientation overlay, 1993.
- [Berg et Vance, 2017a] Leif P. Berg et Judy M. Vance. An Industry Case Study : Investigating Early Design Decision Making in Virtual Reality. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(1) :1–17, mar 2017.
- [Berg et Vance, 2017b] Leif P. Berg et Judy M. Vance. Industry use of virtual reality in product design and manufacturing : a survey. *Virtual Reality*, 21(1) :1–17, mar 2017.
- [Bernardo, 2017] Antonio Bernardo. Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training. *World Neurosurgery*, 106 :1015–1029, 2017.
- [Bhagat *et al.*, 2016] Kaushal Kumar Bhagat, Wei Kai Liou, et Chun Yen Chang. A cost-effective interactive 3D virtual reality system applied to military live firing training. *Virtual Reality*, 20(2) :127–140, 2016.

- [Bourdakis, 1997] Vassilis Bourdakis. The Future of VRML on Large Urban Models. In *The 4th UK VRSIG Conference*, 1997.
- [Bouvier, 2009] Patrice Bouvier. La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur, 2009.
- [Brondi *et al.*, 2016] Raffaello Brondi, Giovanni Avveduto, Marcello Carrozzino, Franco Tecchia, Leila Alem, et Massimo Bergamasco. Immersive technologies and natural interaction to improve serious games engagement. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 9599, pages 121–130. Springer Verlag, 2016.
- [Burdea et Coiffet, 2003] Grigore C. Burdea et Philippe Coiffet. *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
- [Burdea, 1999] Grigore C Burdea. Haptic Feedback for Virtual Reality. In *Virtual Reality and Prototyping Workshop*, page 11, Laval, France, 1999.
- [Burkhardt, 2003] J.-M. Burkhardt. Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66(1) :65, 2003.
- [Castell, 2019] Anne-Lise Castell. Accidents du travail dans le BTP : des chiffres en hausse, nov 2019.
- [CNAM, 2020] CNAM. Sinistralité dans le BTP : état des lieux | ameli.fr | Entreprise, mar 2020.
- [CSTB, 2020] CSTB. Centre des sciences et techniques du bâtiment. <http://www.cstb.fr/>, 2020.
- [Dale, 1969] Edgar Dale. *Audio-visual methods in teaching*. Holt, N.Y., 1969.
- [Du *et al.*, 2018] Jing Du, Zhengbo Zou, Yangming Shi, et Dong Zhao. Zero latency : Real-time synchronization of BIM data in virtual reality for collaborative decision-making. *Automation in Construction*, 85 :51–64, jan 2018.
- [E-Santé, 2014] E-Santé. Accident du travail, les 20 métiers les plus dangereux, quelles démarches en cas d’accident du travail ?, apr 2014.
- [ECP, 2020] Ecole centrale paris. <http://www.ecp.fr/>, 2020.
- [ENSAM, 2020] ENSAM. Arts et métiers paristech. <http://www.ensam.eu/>, 2020.
- [European Commission (EC), 2012] European Commission (EC). European Statistics on Accidents at Work (ESAW) - Summary methodology. Rapport technique, 2012.
- [European Commission(EC), 2010] European Commission(EC). Health and safety at work in Europe. Rapport technique, 2010.
- [Falah *et al.*, 2014] Jannat Falah, Soheeb Khan, Tasneem Alfalah, Salsabeel F. M. Alfalah, Warren Chan, David K. Harrison, et Vassilis Charissis. Virtual Reality medical training system for anatomy education. In *2014 Science and Information Conference*, pages 752–758. IEEE, aug 2014.
- [Fartassi, 2020] Adam Fartassi. Apprendre plus vite : Le Cône d’Apprentissage de Dale | PenserChanger, 2020.
- [Fédération française du bâtiment, 2020] Fédération française du bâtiment. Les chiffres du BTP en France. Rapport technique, 2020.
- [Frisoli *et al.*, 2009] Antonio Frisoli, Fabio Salsedo, Massimo Bergamasco, Bruno Rossi, et Maria C. Carboncini. A force-feedback exoskeleton for upper-limb rehabilitation in virtual reality. *Applied Bionics and Biomechanics*, 6(2) :115–126, jul 2009.

- [Fuchs *et al.*, 2006] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, et Alain Berthoz. Le traité de la réalité virtuelle volume 1 : L’Homme et l’environnement virtuel, 2006.
- [Fuchs, 2017] Philippe Fuchs. *Virtual reality headsets-a theoretical and pragmatic approach*. CRC Press, 2017.
- [Ganah et John, 2015] Abdulkadir Ganah et Godfaurd A. John. Integrating building information modeling and health and safety for onsite construction. *Safety and Health at Work*, 6(1) :39–45, 2015.
- [Gee, 2005] James Paul Gee. Learning by Design : Good Video Games as Learning Machines. *E-Learning and Digital Media*, 2(1) :5–16, 2005.
- [Genty, 2015] A. Genty. Virtual Reality for the construction industry, the CALLISTO-SARI project, benefits for BOUYGUES CONSTRUCTION. *ACM International Conference Proceeding Series*, 08-10-April-2015, 2015.
- [Gowsalya et Asma, 2017] RS Gowsalya et Vkm Asma. A Study On Training Effectiveness. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 2(5) :211–217, 2017.
- [Greenwood *et al.*, 2008] David Greenwood, Margaret Horne, Emine Mine Thompson, Carl Martin Allwood, Claes Wernemyr, et Börje Westerdahl. Strategic perspectives on the use of virtual reality within the building industries of four countries. *Architectural engineering and design management*, 4(2) :85–98, 2008.
- [HaiyanXie *et al.*, 2006] HaiyanXie, M Eduard Tudoreanu, et Weishi. Development of a Virtual Reality Safety-Training System for Construction Workers. *Proceedings of the 6th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, page 9, 2006.
- [Hallowell et Gambatese, 2009] Matthew R Hallowell et John a Gambatese. Formwork Construction. *October*, 135(October) :990–998, 2009.
- [Hamari *et al.*, 2016] Juho Hamari, David J. Shernoff, Elizabeth Rowe, Brianno Coller, Jodi Asbell-Clarke, et 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, jan 2016.
- [Happe, 2011] Didier Happe. La réalité augmentée au service de la mise en valeur du patrimoine culturel. *XYZ*, (128) :50–54, 2011.
- [Health and Safety Executive, 2017a] Health and Safety Executive. Fatal injuries arising from accidents at work in Great Britain 2017. pages 1–16, 2017.
- [Health and Safety Executive, 2017b] Health and Safety Executive. Work-related Musculoskeletal Disorders (WRMSDs) Statistics in Great Britain 2017. *Work-related Musculoskeletal Disorders (WRMSDs) Statistics in Great Britain 2017*, 1(1) :22, 2017.
- [Hecht *et al.*, 2006] David Hecht, Miriam Reiner, et Gad Halevy. Multimodal Virtual Environments : Response Times, Attention, and Presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5) :515–523, oct 2006.
- [Heilig, 1960] Morton L Heilig. Stereoscopic-television apparatus for individual use, 1960.
- [Heilig, 1962] Morton L Heilig. Sensorama Simulator, 1962.
- [Heng *et al.*, 2004] Pheng Ann Heng, Chun Yiu Cheng, Tien Tsin Wong, Yangsheng Xu, Yim Pan Chui, Kai Ming Chan, et Shiu Kit Tso. A virtual-reality training

- system for knee arthroscopic surgery. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 8(2) :217–227, jun 2004.
- [Hilfert *et al.*, 2016] Thomas Hilfert, Jochen Teizer, et Markus König. First Person Virtual Reality for Evaluation and Learning of Construction Site Safety. 4(Isarc) :2016, 2016.
- [Huang et Hinze, 2003] Xinyu Huang et Jimmie Hinze. Analysis of Construction Worker Fall Accidents. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(3) :262–271, 2003.
- [Huotari et Hamari, 2012] Kai Huotari et Juho Hamari. Defining gamification. In *Proceeding of the 16th International Academic MindTrek Conference on - MindTrek '12*, page 17, New York, New York, USA, jan 2012. ACM Press.
- [Immersion, 2020] Immersion. Immersion. <http://www.immersion.fr/>, 2020.
- [INRS, 2014] INRS. Principes généraux de la démarche de prévention, nov 2014.
- [INRS, 2017] INRS. Bâtiment et travaux publics - Pas de travaux sans prévention, oct 2017.
- [International Labour Office, 2015] International Labour Office. Health and Safety Hazards in the Construction Industry. In *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, éditeur ILO, chapitre 93. 4 édition, 2015.
- [Interrante *et al.*, 2006] Victoria Interrante, Brian Ries, et Lee Anderson. Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited. *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, pages 3–10, 2006.
- [Jensen *et al.*, 2011] Matthew J. Jensen, A. Madison Tolbert, John R. Wagner, Fred S. Switzer, et Joshua W. Finn. A customizable automotive steering system with a haptic feedback control strategy for obstacle avoidance notification. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(9) :4208–4216, 2011.
- [Jeon, 2015] Chihyung Jeon. The Virtual Flier : The Link Trainer, Flight Simulation, and Pilot Identity. *Technology and Culture*, 56(1) :28–53, 2015.
- [K-Ryole, 2020] K-Ryole. K-Ryole - Chariot Kross, 2020.
- [Kamsin, 2005] Amirrudin Kamsin. Is E-Learning the Solution and Substitute for Conventional Learning? *International Journal of The Computer, the Internet and Management*, 13(3) :79—89, 2005.
- [Kemeny, 2014] Andras Kemeny. From driving simulation to virtual reality. In *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference on - VRIC '14*, pages 1–5, New York, New York, USA, 2014. ACM Press.
- [Kim *et al.*, 2004] Hyun K. Kim, David W. Rattner, et Mandayam A. Srinivasan. Virtual-reality-based laparoscopic surgical training : The role of simulation fidelity in haptic feedback. *Computer Aided Surgery*, 9(5) :227–234, 2004.
- [Kozłak *et al.*, 2013] Marek Kozłak, Antoni Kurzeja, et Aleksander Nawrat. Virtual Reality Technology for Military and Industry Training Programs. volume 481 de *Studies in Computational Intelligence*, pages 327–334. Springer International Publishing, Heidelberg, 2013.
- [Kumar et Sharma, 2001] A Kumar et R Sharma. *Personnel Management Theory And Practice, 3 Vols. Set*. Atlantic Publishers & Distributors (P) Limited, 2001.

- [Kuntz *et al.*, 2018] Sébastien Kuntz, Richard Kulpa, et Jérôme Royan. The Democratization of VR-AR. In *Virtual Reality and Augmented Reality*, pages 73–122. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, mar 2018.
- [Leborgne, 2020] Leborgne. Pince à talon Nanovib, 2020.
- [Lécuyer *et al.*, 2001] Anatole Lécuyer, Abderrahmane Kheddar, Sabine Coquillart, Ludovic Graux, et Philippe Coiffet. A haptic prototype for the simulations of aeronautics mounting/unmounting operations. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 182–187, 2001.
- [Lele, 2013] Ajey Lele. Virtual reality and its military utility. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 4(1) :17–26, 2013.
- [Liangxu, 2002] Ding Liangxu. Virtual Technique and Automobile Industry. *Bus Technology and Research*, 2, 2002.
- [Lim *et al.*, 2007] Hyochang Lim, Sang Gun Lee, et Kichan Nam. Validating E-learning factors affecting training effectiveness. *International Journal of Information Management*, 27(1) :22–35, feb 2007.
- [Link, 1931] JR Edwin A Link. Combination training device for student aviators and entertainment apparatus, 1931.
- [López-Arquillos *et al.*, 2014] Antonio López-Arquillos, Juan Carlos Rubio-Romero, Alistair G.F. Gibb, et John A. Gambatese. Safety risk assessment for vertical concrete formwork activities in civil engineering construction. *Work*, 49(2) :183–192, 2014.
- [LUT, 2020] Laboratoire des usages en technologies d’information numérique. <http://www.lutin-userlab.fr/site/accueil/>, 2020.
- [Malloy et Milling, 2010] Kevin M. Malloy et Leonard S. Milling. The effectiveness of virtual reality distraction for pain reduction : A systematic review. *Clinical Psychology Review*, 30(8) :1011–1018, dec 2010.
- [Martin, 2016] Hugo Martin. *Maquette numérique 3D pour la construction : visualiser les connaissances métier et interagir avec des dispositifs immersifs*. PhD thesis, 2016.
- [Memmi *et al.*, 2019] S Memmi, E Rosankis, N Sandret, P Duprat, M Leonard, S Morand, et V Tassy. Premiers résultats de l’enquête SUMER 2017 : comment ont évolué les expositions des salariés aux risques professionnels sur les vingt dernières années ? Rapport technique, INRS, 2019.
- [Ministère du Travail, 2008a] Ministère du Travail. Code du travail - Article R4541-8, 2008.
- [Ministère du Travail, 2008b] Ministère du Travail. Manutention des charges, mar 2008.
- [Ministère du Travail, 2019] Ministère du Travail. Plan de développement des compétences, 2019.
- [Moshell, 1993] M. Moshell. Three views of virtual reality : virtual environments in the US military. *Computer*, 26(2) :81–82, feb 1993.
- [Mujber *et al.*, 2004] T.S. Mujber, T. Szecsi, et M.S.J. Hashmi. Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156 :1834–1838, nov 2004.
- [Nikolic *et al.*, 2019] Dragana Nikolic, John I. Messner, Sanghoon Lee, et Chimay J. Anumba. The virtual construction simulator - development of an educational simulation game, jan 2019.

- [Officiel Prevention, 2011] Officiel Prevention. Sécurité au travail, prévention risque professionnel. Officiel Prevention, annuaire CHSCT, jan 2011.
- [OPPBTP, 2016a] OPPBTP. Les manutentions manuelles de charges, jun 2016.
- [OPPBTP, 2016b] OPPBTP. Pénibilité et conditions de travail, jun 2016.
- [OPPBTP, 2016c] OPPBTP. Pénibilité et conditions de travail, jun 2016.
- [OPPBTP, 2016d] OPPBTP. Troubles musculo-squelettiques (TMS), 2016.
- [OPPBTP, 2019a] OPPBTP. Travail en hauteur Prévention BTP, 2019.
- [OPPBTP, 2019b] OPPBTP. Travail en hauteur Prévention BTP, 2019.
- [Outinord, 2020] Outinord. Bienvenue sur le site Outinord, 2020.
- [Patrão et Menezes, 2013] Bruno Patrão et Paulo Menezes. An immersive system for the training of tower crane operators. In *Proceedings - 2013 2nd Experiment@ International Conference, exp.at 2013*, pages 158–159, 2013.
- [Patterson *et al.*, 2010] David R. Patterson, Mark P. Jensen, Shelley A. Wiechman, et Sam R. Sharar. Virtual Reality Hypnosis for Pain Associated With Recovery From Physical Trauma. *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, 58(3) :288–300, may 2010.
- [Petrova *et al.*, 2017] Ekaterina Aleksandrova Petrova, Mai Rasmussen, Rasmus Lund Jensen, et Kjeld Svidt. Integrating Virtual Reality and BIM for End-user Involvement in Building Design : a case study. *Lc3 2017*, pages 699–709, 2017.
- [Pinto *et al.*, 2011] Abel Pinto, Isabel L. Nunes, et Rita A. Ribeiro. Occupational risk assessment in construction industry - Overview and reflection. *Safety Science*, 49(5) :616–624, 2011.
- [Plotly Technologies Inc., 2015] Plotly Technologies Inc. Collaborative data science, 2015.
- [Pohlenz *et al.*, 2010] Philipp Pohlenz, Alexander Gröbe, Andreas Petersik, Norman von Sternberg, Bernhard Pflessner, Andreas Pommert, Karl-Heinz Höhne, Ulf Tiede, Ingo Springer, et Max Heiland. Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 38(8) :560–564, dec 2010.
- [Pouvrasseur *et al.*, 2017] Franck Pouvrasseur, Éric Monacelli, Sébastien Charles, Vélizy-villacoublay France, Alain Schmid, R Edf, Frédéric Goncalves, et Faustine Coulmier. Discussion about functionalities of the Virtual Fauteuil simulator for wheelchair training environment. 2017.
- [Prensky, 2005] Marc Prensky. Complexity Matters. *Educational Technology*, 45(4), feb 2005.
- [Punnett et Wegman, 2004] Laura Punnett et David H. Wegman. Work-related musculoskeletal disorders : The epidemiologic evidence and the debate. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(1) :13–23, 2004.
- [R Core Team, 2017] R Core Team. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017.
- [Ramazzini, 1777] Bernardino Ramazzini. *Essai sur les maladies des artisans traduit du latin de Ramazzini, avec des notes et des additions [et une Introduction] par M. de Fourcroy maître-ès-arts de l'Université de Paris, étudiant en médecine [Approbation de la Société royale de Médecine, Paris, 17 déc.1776]*. Moutard, 1777.

- [Rizzo *et al.*, 2015] Albert Rizzo, Judith Cukor, Maryrose Gerardi, Stephanie Alley, Chris Reist, Mike Roy, Barbara O. Rothbaum, et Jo Ann Difede. Virtual Reality Exposure for PTSD Due to Military Combat and Terrorist Attacks. *Journal of Contemporary Psychotherapy*, 45(4) :255–264, 2015.
- [Roy *et al.*, 2017] Elby Roy, Mahmoud M. Bakr, et Roy George. The need for virtual reality simulators in dental education : A review. *Saudi Dental Journal*, 29(2) :41–47, 2017.
- [Sacks *et al.*, 2013] Rafael Sacks, Amotz Perlman, et Ronen Barak. Construction safety training using immersive virtual reality. *Construction Management and Economics*, 31(9) :1005–1017, 2013.
- [Saint-Gobain et Clarte, 2012] Saint-Gobain et Clarte. Wit4pro : Weber innovative trainer for projection. 2012.
- [Savall *et al.*, 2002] Joan Savall, Diego Borro, Jorge J. Gil, et Luis Matey. Description of a Haptic system for virtual maintainability in aeronautics. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3 :2887–2892, 2002.
- [Schroeder, 1993] Ralph Schroeder. Virtual reality in the real world. History, applications and projections. *Futures*, 25(9) :963–973, 1993.
- [Sheridan, 1992] Thomas B Sheridan. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1) :120–126, 1992.
- [Stork *et al.*, 2012] André Stork, Neyir Sevilmis, Daniel Weber, Dominic Gorecky, Christian Stahl, Matthias Loskyll, et Frank Michel. Enabling virtual assembly training in and beyond the automotive industry. *Proceedings of the 2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, VSMM 2012 : Virtual Systems in the Information Society*, pages 347–352, 2012.
- [Subedi *et al.*, 2017] Sudip Subedi, Nipesh Pradhananga, Armando Carrasquillo, et Francisco Lopez. Virtual Reality-based Personalized Learning Environment for Repetitive Labor-intensive Construction Tasks Construction Safety View project Laser Scanner View project Virtual Reality-based Personalized Learning Environment for Repetitive Labor-intensive Co. Rapport technique, 2017.
- [Sutherland, 1965] Ivan E Sutherland. The ultimate display. *Multimedia : From Wagner to virtual reality*, 1, 1965.
- [The Eastman Kodak Company, 2004] The Eastman Kodak Company. *Kodak 's Ergonomic Design for People at Work*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2nd editio édition, 2004.
- [Universcience, 2020] Universcience. Universcience. <http://www.universcience.fr/fr/accueil/>, 2020.
- [Valero *et al.*, 2016] Enrique Valero, Aparajithan Sivanathan, Frédéric Bosché, et Mohamed Abdel-Wahab. Musculoskeletal disorders in construction : A review and a novel system for activity tracking with body area network. *Applied Ergonomics*, 54 :120–130, 2016.
- [Wang *et al.*, 2006] P. Wang, A.A. Becker, I.A. Jones, A.T. Glover, S.D. Benford, C.M. Greenhalgh, et M Vloeberghs. A virtual reality surgery simulation of cutting and retraction in neurosurgery with force-feedback. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 84(1) :11–18, oct 2006.

- [Wang *et al.*, 2011] Xiangyu Wang, Phillip S Dunston, Robert Proctor, Lei Hou, J C Y So, Joey Chung, Yin So, et J C Y So. Reflections on using a game engine to develop a virtual training system for construction excavator operators. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011*, pages 631–636, 2011.
- [Welch *et al.*, 2000] L S Welch, K L Hunting, et J Anderson. Concrete form work, injury and musculoskeletal disorders. *Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Association, 'Ergonomics for the New Millennium'*, San Diego,(October 1990) :647–650, 2000.
- [Wendel *et al.*, 2010] Viktor Wendel, Maxim Babarinow, Tobias Hörl, Sergej Kolmogorov, Stefan Göbel, et Ralf Steinmetz. Woodment : Web-Based Collaborative Multi-player Serious Game. pages 68–78, 2010.
- [Whitton et Moseley, 2012] Nicola Whitton et Alex Moseley. *Using Games to Enhance Learning and Teaching*. Routledge, New York, NY, US, 1 édition, may 2012.
- [Whyte *et al.*, 2000] J. Whyte, N. Bouchlaghem, A. Thorpe, et R. McCaffer. From CAD to virtual reality : Modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in construction*, 10(1) :43–45, nov 2000.
- [Woodford, 2007] Chris Woodford. Virtual reality, 2007.
- [Xiao *et al.*, 2001] Tian-yuan Xiao, Xiang-li HAN, et Lin-xuan ZHANG. Research on Virtual Manufacturing Technology and it's Application. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 1, 2001.
- [Yoder, 1942] Dale Yoder. *Personnel management and industrial relations*. Prentice-Hall, Inc, New York, 1942.
- [Zenner et Krüger, 2019] André Zenner et Antonio Krüger. Drag :on – A Virtual Reality Controller Providing Haptic Feedback Based on Drag and Weight Shif. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*, volume s3-VII, pages 1–12, New York, New York, USA, 2019. ACM Press.
- [Zhao *et al.*, 2009] Dong Zhao, Jason Lucas, et Walid Thabet. Using virtual environments to support electrical safety awareness in construction. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, pages 2679–2690, dec 2009.
- [Zhonghua *et al.*, 2008] Lu Zhonghua, Chen Dingfang, Dong Haoming, Shen Chenlin, et Liu Zhe. Research on distributed multi-screen overhead crane simulator. In *2008 3rd International Conference on Pervasive Computing and Applications, ICPCA08*, volume 2, pages 1003–1006, 2008.
- [Zimmermann, 2008] Peter Zimmermann. Virtual Reality Aided Design. A survey of the use of VR in automotive industry. In *Product Engineering*, pages 277–296. Springer Netherlands, Dordrecht, 2008.

Annexe A

Questionnaires et documents présentés pendant l'expérimentation

A.1 Questionnaires

Nous avons rédigé un questionnaire afin d'observer l'impact des différents outils proposés, présentés dans le chapitre 5, sur l'apprentissage de nos participants.

Le questionnaire a été rédigé en deux langues : en français et en anglais.

Chaque question a été classée et notée selon des critères établis avant l'expérimentation.

A.1.1 Classement et notation des questions

Nous avons classés ces questions en deux catégories : les questions principales et les questions secondaires. Nous avons attribué une note à chaque question. Cette note correspond au nombre de réponse(s) exacte(s) pour chaque question.

TABLE A-1: Répartition des questions du questionnaire :
 en vert, les questions principales, en blanc, les questions secondaires. En jaune, le
 nombre de bonne(s) réponse(s) pour chaque question

N°	Questions	Bonnes réponses
1	A quoi sert une banche ?	1
2	Dessiner une banche	1
3	Quelles sont les largeurs de banche existantes ?	3
4	Combien pèse une banche ?	4
5	Avec quoi déplace-t-on une banche ?	3
6	Quels sont les principaux risques liés à la banche ?	4
7	Quelles sont les parties du corps qui sont les plus sujets à des blessures lors de la manipulation de la banche ?	8
8	Évaluez de 0 - Pas de risques à 10 - risque élevé le risque sur les parties sélectionnées	8
9	A quoi sert une barre à mine ?	2
10	Combien pèse une barre à mine ?	1
11	Quelle est la longueur d'une barre à mine ?	1
12	Comment utilise-t-on la barre à mine ?	2
13	Où place-t-on la barre à mine pour déplacer la banche ?	3
14	Quelles sont les parties du corps qui sont les plus sujets à des blessures lors de la manipulation de la barre à mine ?	7
15	Évaluez de 0 - Pas de risques à 10 - risque élevé le risque su les parties sélectionnées	7

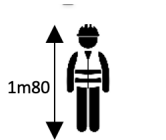
A.1.2 Questionnaire en français

Questionnaire *Virtual Compagnon**Certaines questions peuvent comporter plusieurs réponses.*

1. A quoi sert une banche ?

- Déplacer des charges Donner une forme au béton
 Dénuder des câbles électriques Je ne sais pas

2. Dessinez une banche



3. Quelles sont les largeurs de banche existantes ?

- 1,2 m 2,9 m 0,6 m 3,5 m 2,4 m 4,8 m Je ne sais pas

4. Combien pèse une banche ?

- $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $180 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$
 $225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ Je ne sais pas

5. Avec quoi déplace-t-on une banche pour la placer au bon endroit ?

- Les mains Les pieds Une clé Allen Un marteau Un chariot élévateur
 Une grue Une barre à mine Je ne sais pas

6. Quels sont les principaux risques liés à la banche ?

- Chute de hauteur Chute de plain-pied Basculement Heurt Je ne sais pas

7. Quelles sont les parties du corps qui sont les plus sujets à des blessures lors de la manipulation de la banche ?

- Le dos Les cuisses Les avant-bras Les pectoraux Les chevilles La tête Les poignets Le cou Je ne sais pas

8. Évaluez de 0 – Pas de risques à 10 – risque élevé le risque sur les parties sélectionnées.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Le dos											
Les cuisses											
Les avant-bras											
Les pectoraux											
Les chevilles											
La tête											
Les poignets											
Le cou											
Je ne sais pas											

9. A quoi sert une barre à mine ?
 Positionner les banches Creuser un trou Mélanger le béton Monter en haut de la grue Je ne sais pas
10. Combien pèse une barre à mine ?
 1,5 kg 4,5 kg 5,25 kg 7 kg 15 kg Je ne sais pas
11. Quelle est la longueur d'une barre à mine ?
 1,5 m 2 m 1,45 m 1,75 m 1,3 m Je ne sais pas
12. Comment utilise-t-on la barre à mine ?
 Avec les mains A l'aide d'une perceuse Seul A deux personnes Avec le pied Je ne sais pas
13. Où place-t-on la barre à mine pour déplacer la banche ?
 En haut Sur les côtés De face Sous le pied de banche Je ne sais pas
14. Quelles sont les parties du corps qui sont les plus sujets à des blessures lors de l'utilisation de la barre à mine ?
 Le dos Les cuisses Les avant-bras Les pectoraux Les chevilles La tête Les poignets Le cou Je ne sais pas

15. Évaluez de 0 – Pas de risques à 10 – risque élevé le risque sur les parties sélectionnées.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Le dos											
Les cuisses											
Les avant-bras											
Les pectoraux											
Les chevilles											
La tête											
Les poignets											
Le cou											
Je ne sais pas											

16. Avez-vous des remarques et /ou des critiques afin d'améliorer l'expérience? (À répondre à la fin de la session)

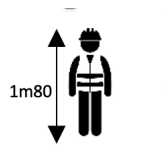
A.1.3 Questionnaire en anglais

Virtual Compagnon Questionnaire

Virtual Compagnon Questionnaire Some questions may have more than one answer

1. What is a formwork panel used for?
- Move heavy loads Shaping concrete Stripping electrical cables I don't know

2. Draw a formwork panel



3. What are the existing widths of formwork panels?
- 1,2 m 2,9 m 0,6 m 3,5 m 2,4 m 4,8 m I don't know
4. How much does a formwork panel weigh?
- $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $180 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ $225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ I don't know
5. What is used to move a formwork panel?
- Hands Feet Hex/Allen Key A hammer A forklift truck A tower crane A crowbar I don't know
6. What are the main risks associated with the formwork panel?
- Fall from height Fall on the same level Overbalance Collision Je ne sais pas
7. Which parts of the body are most prone to injury when handling the formwork panel?
- Back Thighs Forearms Pectorals Ankles Head Wrists Neck I don't know

8. Assess the risk on the selected parts from 0 – not prone to injury to 10 – highly prone to injury.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Back											
Thighs											
Forearms											
Pectorals											
Ankles											
Head											
Wrists											
Neck											
I don't know											

9. What is a crowbar used for ?
 Positioning the formwork panels Digging a hole Mixing the concrete
 Climbing to the top of the crane I don't know
10. How much does a crowbar weigh ?
 1,5 kg 4,5 kg 5,25 kg 7 kg 15 kg I don't know
11. How long is a crowbar ?
 1,5 m 2 m 1,45 m 1,75 m 1,3 m I don't know
12. How is the crowbar used ?
 With hands With a drill Alone In pair With foot I don't know
13. Where is the crowbar placed to move the formwork ?
 On top On the sides From the front Under the formwork panel stand
 I don't know
14. Quelles sont les parties du corps qui sont les plus sujets à des blessures lors de l'utilisation de la barre à mine ?
 Le dos Les cuisses Les avant-bras Les pectoraux Les chevilles La tête Les poignets Le cou Je ne sais pas

15. Assess the risk on the selected parts from 0 – not prone to injury to 10 – highly prone to injury.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Back											
Thighs											
Forearms											
Pectorals											
Ankles											
Head											
Wrists											
Neck											
I don't know											

16. Do you have any comments and/or criticisms to improve the experience? (To be answered at the end of the session)

A.2 Textes descriptifs

Pour accompagner les participants lors des tests, nous avons rédigé des textes explicatifs résumant les tâches qui sont demandés lors des tests.

Nous avons rédigé deux textes : le premier est présenté aux participants avant l'utilisation de l'application en RV et le deuxième leur est présenté avant l'utilisation de la plateforme robotique. Ces textes ont été rédigés en français et en anglais.

A.2.1 Textes descriptifs en français

Texte présenté avant le lancement de l'application RV

« Dans cette simulation, vous devrez porter un casque de réalité virtuelle (de type HTC Vive) et vous aurez une manette dans la main. Vous devez placer la barre à mine virtuelle à l'endroit indiqué sur la banche et la lever. Pour cela, appuyez sur la touche « Grip » de la manette (Fig. A-1) pour faire apparaître la barre à mine virtuelle. Une fois la barre placée, appuyez et maintenez la touche « Trigger » et bougez votre bras de haut en bas pour lever le panneau. Vous pouvez récupérer la barre à mine en appuyant à nouveau sur la touche « Grip ». »

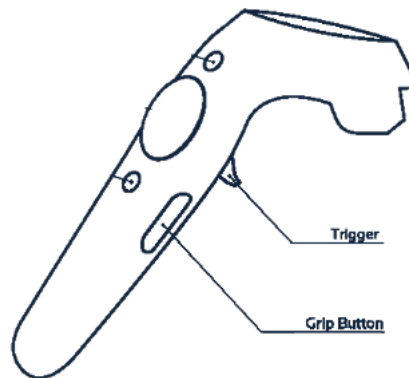


FIGURE A-1: Schéma explicatif des boutons de la manette du HTC Vive

Texte présenté avant l'utilisation de la plateforme

« Dans cette simulation, vous devrez porter un casque de réalité virtuelle (de type HTC Vive) et vous aurez une barre à mine réelle dans les mains. Vous devez placer la barre à mine dans la plateforme robotique, représentée par une banche virtuelle dans l'environnement virtuel, à l'endroit indiqué afin de lever la banche. Bougez votre bras de haut en bas pour lever le panneau. »

A.2.2 Textes descriptifs en anglais

Texte présenté avant le lancement de l'application RV

« In this simulation, you will have to wear a virtual reality headset (HTC Vive HMD) and you will have a controller in your hand. You must place the virtual crowbar where indicated on the formwork panel and lift it up. To do this, press the « Grip » button on the joystick (Fig. A-2) to make the virtual crowbar appear. Once the bar is placed, press and hold the « Trigger » key and move your arm up and down to raise the panel. You can retrieve the crowbar by pressing the « Grip » key again. »

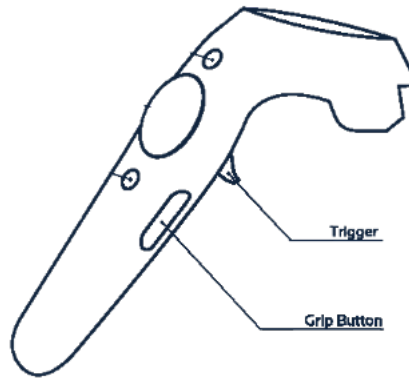


FIGURE A-2: Explanatory diagram of the buttons on the HTC Vive controller

Texte présenté avant l'utilisation de la plateforme

« In this simulation, you'll have to wear a virtual reality headset (HTC Vive HMD) and you'll have a real crowbar in your hands. You must place the crowbar in the robotic platform, represented by a virtual formwork panel in the virtual environment, at the indicated location in order to raise the formwork. Move your arm up and down to raise the panel. »

Annexe B

Analyse du questionnaire

B.1 Questions principales

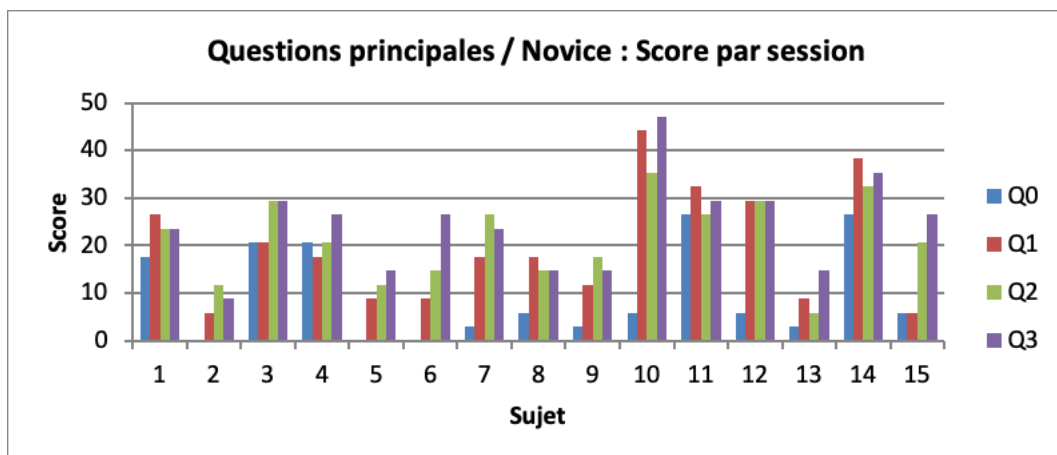
Note : les questions principales sont sur 34 points

B.1.1 Groupe Novice

— Moyenne et écart-type des scores

	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
novice	9,6	19,6	21,4	24,3
écart-type	9,8	12,1	8,6	9,8

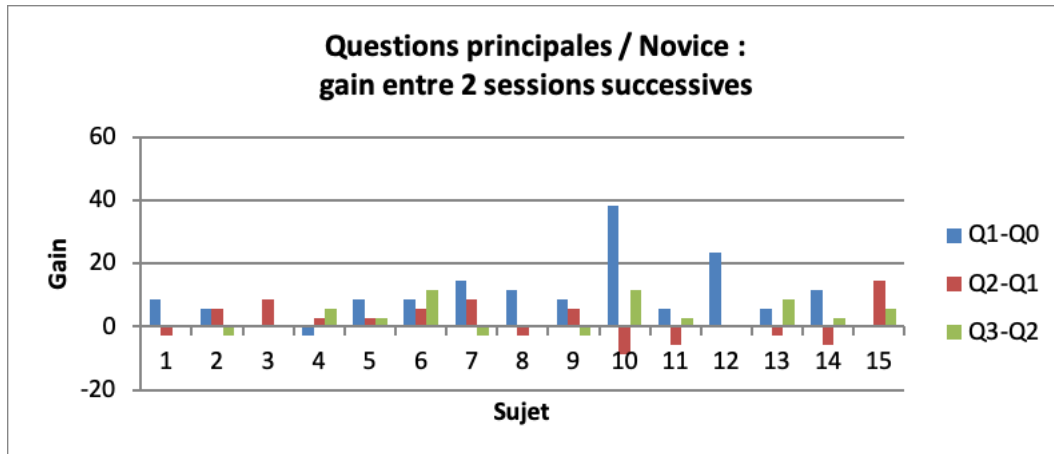
— Tracé



— Moyenne et écart-type des effets

	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
novice	10,0	1,8	2,9
écart-type	10,1	6,7	5,0

— Tracé



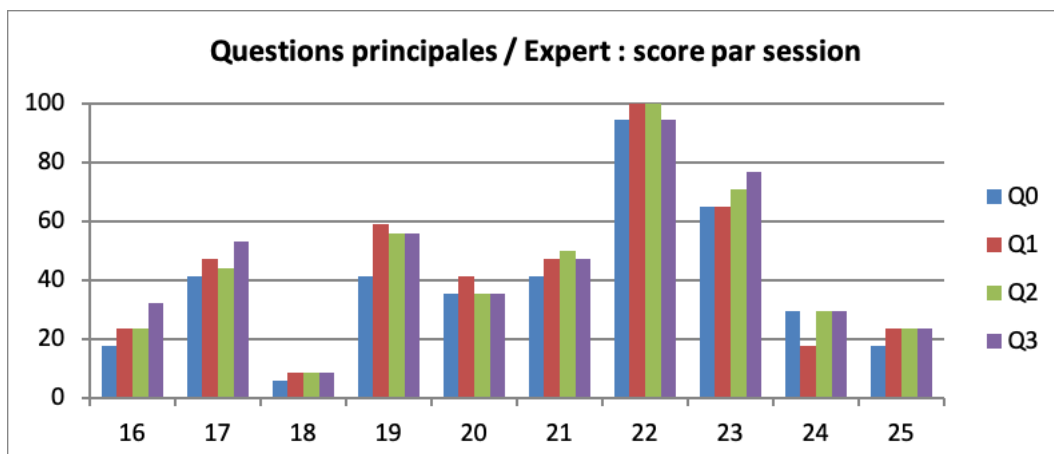
B.1.2 Groupe Expert

— Moyenne et écart-type des scores

	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
expert	38,8	43,2	44,1	45,6
écart-type	25,4	27,0	26,6	25,5

A noter : grande variabilité entre les experts.

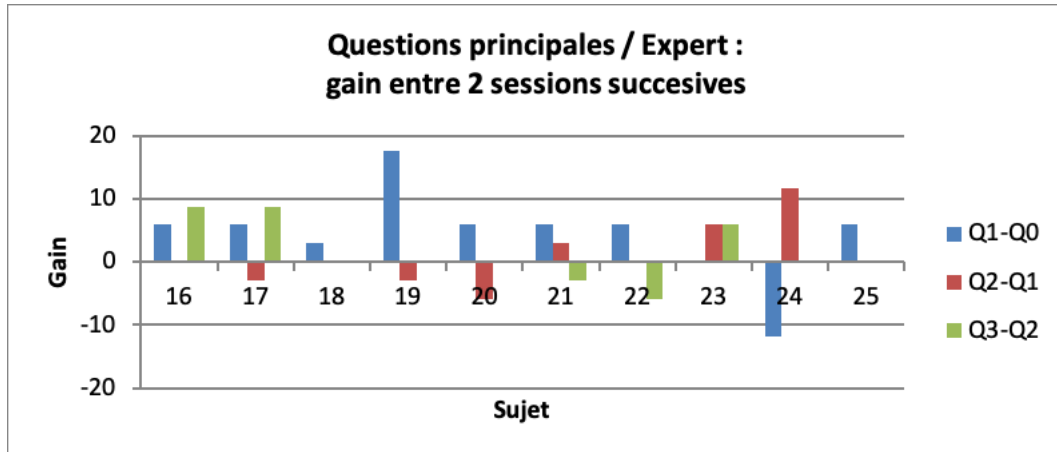
— Tracé



— Moyenne et écart-type des effets

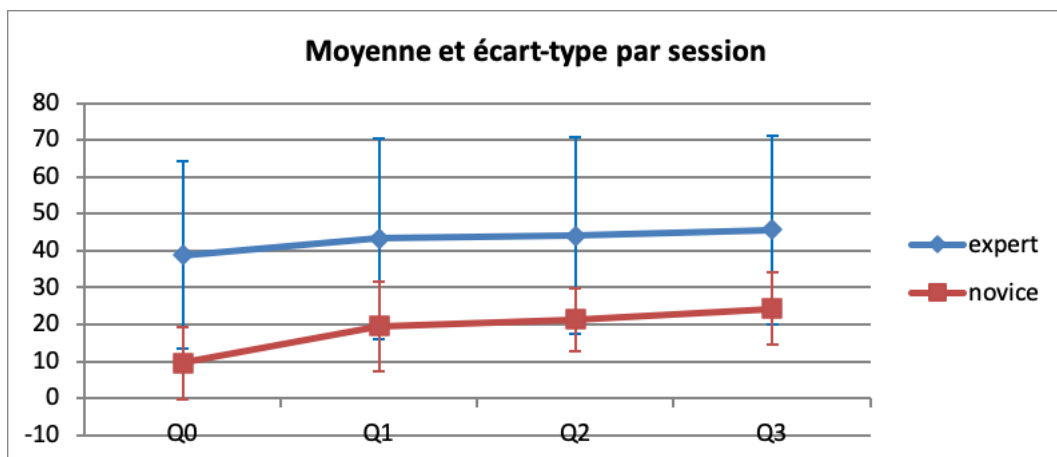
	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
expert	4,4	0,9	1,5
écart-type	7,2	5,0	4,9

— Tracé



B.1.3 Comparaison des groupes

— Tracés

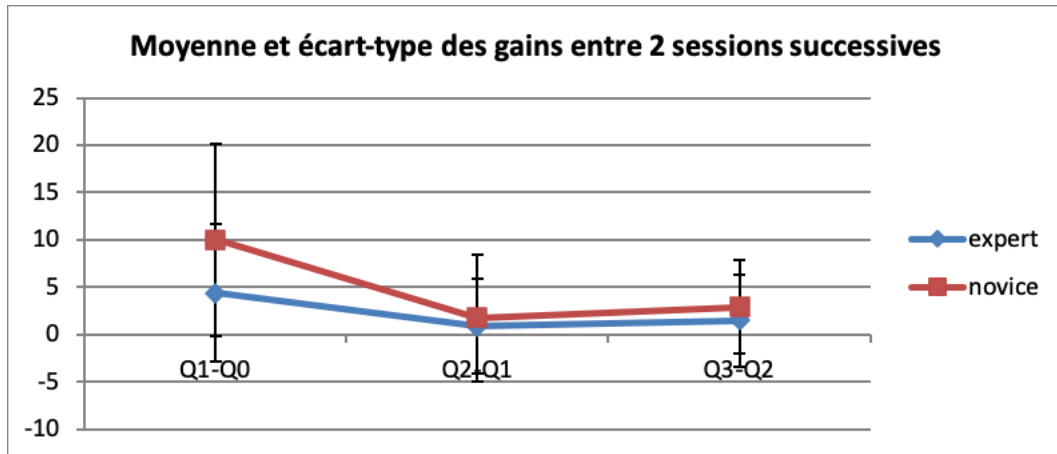


— Analyse des scores

Nous appliquons une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes.

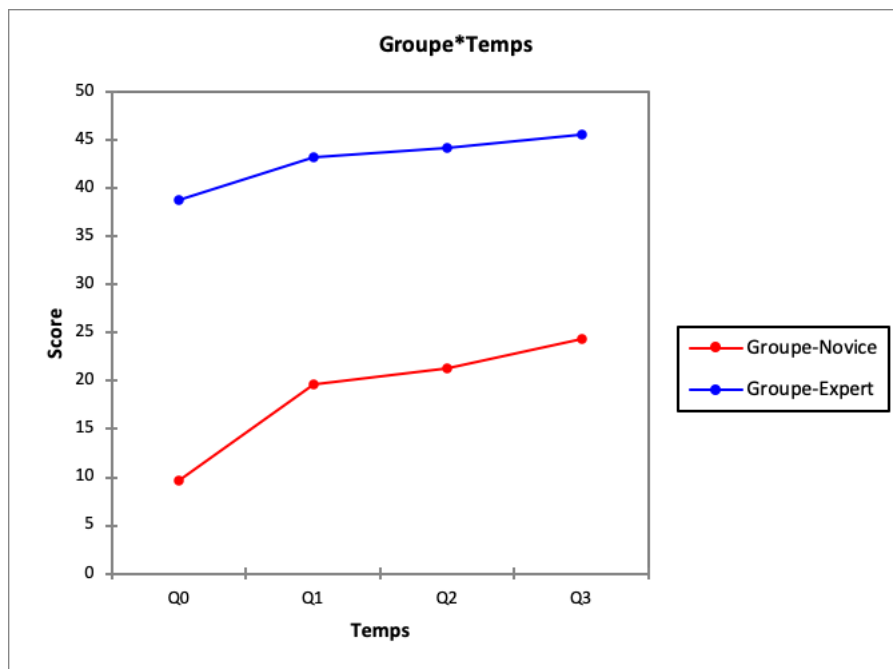
La variable dépendante (à expliquer) est le score.

Les variables explicatives sont le facteur « temps » (i.e. la session : $Q_0 / Q_1 / Q_2 / Q_3$) et le facteur groupe (Expert/Novice).



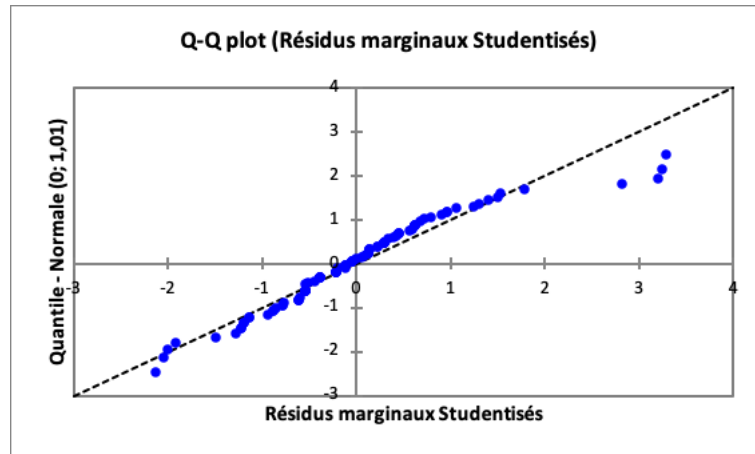
Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Groupe	1	92	11,341	0,001
Temps	3	92	23,141	< 0,0001
Groupe × Temps	3	92	2,685	0,051

Il y a un effet significatif de l'interaction Groupe × Temps ce qui signifie que l'effet du temps (de la session) n'est pas le même en fonction des groupes :



Il faut donc analyser l'effet du temps sur chaque groupe séparément.

Vérification du modèle : on trace Le Q-Q plot des résidus normalisés de Student.



A part 3 points extrêmes le tracé suit la diagonale ce qui signifie que les résidus sont approximativement gaussiens et donc que les hypothèses du modèle sont vérifiées.

Un test de normalité de Shapiro–Wilk rejette l’hypothèse que l’échantillon suit une loi normale ($p < 0.0001$) en raison de ces points.

Les 3 points extrêmes correspondent au sujet 22 : qui est à part car il a de très bons résultats.

Une analyse sans ce sujet confirme son influence : le test de Shapiro–Wilk n’est plus significatif ($p = 236$).

Pour analyser l’effet du temps sur chaque groupe séparément, nous appliquons, pour chaque groupe, une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes et si les conditions ne sont pas vérifiées nous appliquons un test de Friedman.

La variable dépendante (à expliquer) est le score.

La variables explicative est le facteur « temps » (i.e. la session : $Q_0 / Q_1 / Q_2 / Q_3$).

Pour le groupe novice :

Le modèle mixte n’est pas vérifié.

Test de Friedman	
Q (Valeur observée)	24,885
Q (Valeur critique)	7,815
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

La différence entre les moyennes de sessions est significative ($p < 0.0001$).

Quelles moyennes sont différentes ? Nous appliquons les tests post-hoc de Nemenyi.

p-values				
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	1	0,003	0,001	< 0,0001
Q ₁	0,003	1	0,621	0,104
Q ₂	0,001	0,621	1	0,258
Q ₃	< 0,0001	0,104	0,258	0
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083				

Différences significatives				
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	Non	Oui	Oui	Oui
Q ₁	Oui	Non	Non	Non
Q ₂	Oui	Non	Non	Non
Q ₃	Oui	Non	Non	Non

Seule Q₀ diffère significativement des autres sessions.

Pour le groupe expert :

Le modèle mixte n'est pas vérifié.

On retrouve ce résultat avec un test de Friedman.

Test de Friedman	
Q (Valeur observée)	12,500
Q (Valeur critique)	7,815
p-value (bilatérale)	0,004
alpha	0,05

La différence entre les moyennes de sessions est significative (p=0,004).

Quelles moyennes sont différentes ? Nous appliquons les tests post-hoc de Nemenyi.

p-values				
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	1	0,015	0,012	0,007
Q ₁	0,015	1	0,931	0,795
Q ₂	0,012	0,931	1	0,862
Q ₃	0,007	0,795	0,862	0
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083				

Différences significatives				
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	Non	Non	Non	Oui
Q ₁	Non	Non	Non	Non
Q ₂	Non	Non	Non	Non
Q ₃	Oui	Non	Non	Non

Seule Q₃ diffère significativement de Q₀.

B.1.4 Effets

Nous appliquons une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes.

La variable dépendante (à expliquer) est le gain entre 2 sessions successives.

Les variables explicatives sont le facteur « temps » (i.e. les sessions : Q₁ - Q₀ / Q₂ - Q₁ / Q₃ - Q₂) et le facteur groupe (Expert/Novice).

Le modèle mixte est vérifié.

Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Groupe	1	69	4,929	0,03
Temps	2	69	4,973	0,01
Groupe × Temps	2	69	0,667	0,516

Pas d'effet d'interaction Groupe × Temps.

Un effet Groupe : les gains diffèrent entre les groupes et un effet Temps : les gains diffèrent en fonction des sessions.

Quelles sont les différences 2 à 2 ? Nous appliquons les tests post-hoc de Tukey (HSD).

Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%					
Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
novice vs expert	2,647	1,538	1,995	0,090	Non
Valeur critique du d de Tukey : 2,821					

Les gains du groupe Novice sont supérieurs en moyenne mais non significativement (manque de puissance statistique) à ceux du groupe Expert.

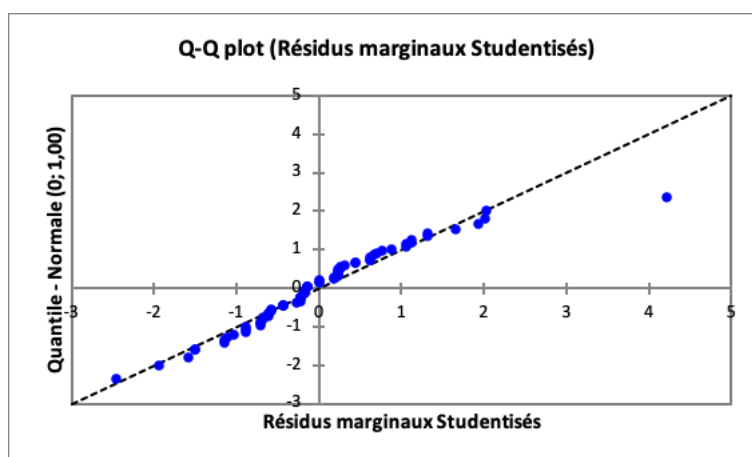
Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
novice	4,902	A	
expert	2,255		A

Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%					
Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
$Q_1 - Q_0$ vs $Q_2 - Q_1$	5,882	1,883	2,396	0,007	Oui
$Q_1 - Q_0$ vs $Q_3 - Q_2$	5,000	1,883	2,396	0,026	Oui
$Q_3 - Q_2$ vs $Q_2 - Q_1$	0,882	1,883	2,396	0,886	Non
Valeur critique du d de Tukey : 3,388					

Le gain $Q_1 - Q_0$ diffère significativement des gains $Q_2 - Q_1$ et $Q_3 - Q_2$.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
$Q_1 - Q_0$	7,206	A	
$Q_3 - Q_2$	2,206		B
$Q_2 - Q_1$	1,324		B

Vérification du modèle : on trace Le Q-Q plot des résidus normalisés de Student.



A part 1 point extrême le tracé suit la diagonale ce qui signifie que les résidus sont approximativement gaussiens et donc que les hypothèses du modèle sont vérifiées.

Un test de normalité de Shapiro-Wilk rejette l'hypothèse que l'échantillon suit une loi normale ($p=0.002$) en raison de ce point.

Le point extrême correspond au sujet 10 : qui est à part car il a un gain $Q_1 - Q_0$ très important (+38).

Une analyse sans ce sujet confirme son influence : le test de Shapiro–Wilk n’est plus significatif ($p=0,354$).

Nous pouvons analyser les groupes séparément mais cela engendrera une perte de puissance.

Pour analyser l’effet du temps sur chaque groupe séparément, nous appliquons, pour chaque groupe, un test de Friedman.

Pour le groupe novice :

Test de Friedman	
Q (Valeur observée)	6,035
Q (Valeur critique)	5,991
p-value (bilatérale)	0,046
alpha	0,05

La différence entre les gains moyens de sessions est significative ($p=0,046$).

Quels gains moyens sont différents ? Nous appliquons les tests post–hoc de Nemenyi.

p-values			
	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
$Q_1 - Q_0$	1	0,018	0,144
$Q_2 - Q_1$	0,018	1	0,361
$Q_3 - Q_2$	0,144	0,361	0
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0167			

Les tests post–hoc ne montrent pas de différence (manque de puissance statistique).

Pour le groupe expert :

Test de Friedman	
Q (Valeur observée)	2,737
Q (Valeur critique)	5,991
p-value (bilatérale)	0,268
alpha	0,05

Pas de différence significative entre les gains ($p=0,272$).

B.1.5 Corrélations entre les scores

Les corrélations de Pearson sont calculées entre les scores des différentes sessions. Pour tenir compte de la multiplicité des tests nous appliquons une correction de Bonferroni pour la significativité donc $p=0,008$ ($0,05/6$). Groupe novice :

Matrice de corrélation (Pearson)				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	1	0,591	0,559	0,464
Q ₁	0,591	1	0,847	0,805
Q ₂	0,559	0,847	1	0,861
Q ₃	0,464	0,805	0,861	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,008$

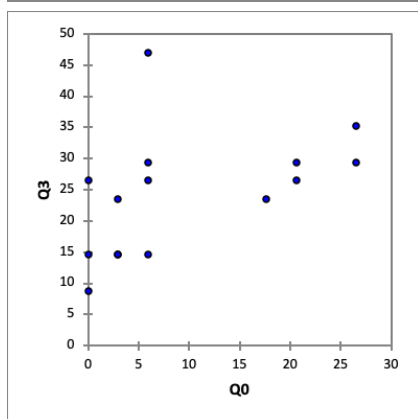
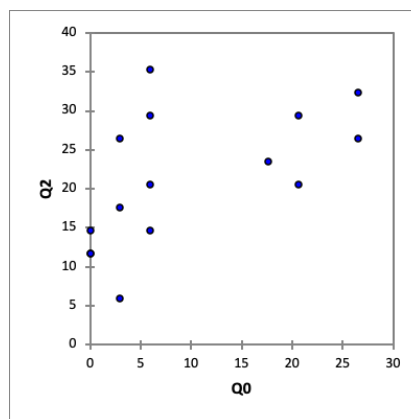
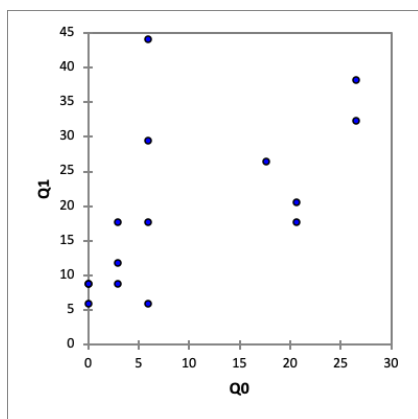
p-values				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	0	0,020	0,030	0,081
Q ₁	0,020	0	< 0,0001	0,0003
Q ₂	0,030	< 0,0001	0	< 0,0001
Q ₃	0,081	0,0003	< 0,0001	0

Les scores Q₀ ne sont pas corrélés aux autres scores.

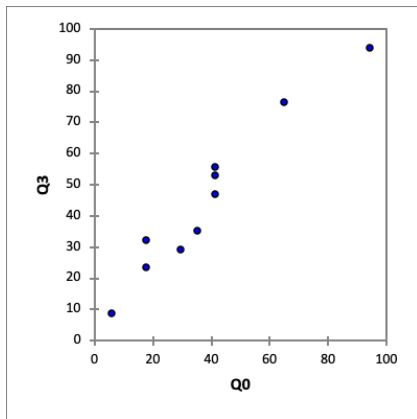
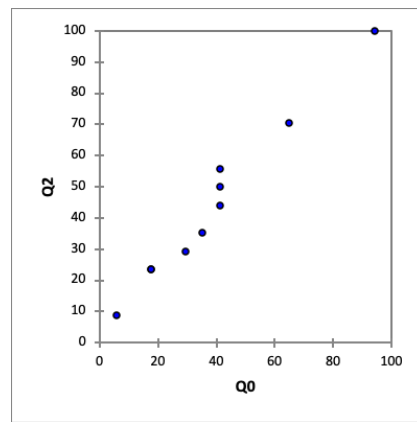
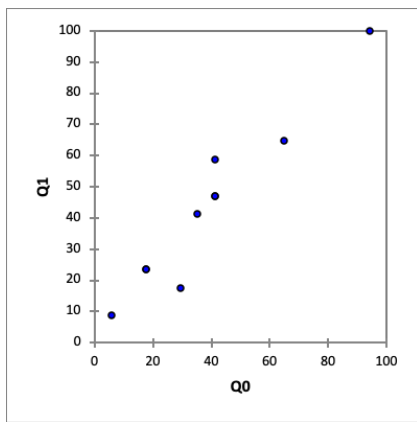
Groupe expert :

Matrice de corrélation (Pearson)				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	1	0,964	0,987	0,972
Q ₁	0,964	1	0,983	0,969
Q ₂	0,987	0,983	1	0,984
Q ₃	0,972	0,969	0,984	1

p-values				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	0	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Q ₁	< 0,0001	0	< 0,0001	< 0,0001
Q ₂	< 0,0001	< 0,0001	0	< 0,0001
Q ₃	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0



Forte corrélation entre tous les scores. Ceci est lié au fait que les scores varient peu d'une session à l'autre.



B.2 Questions secondaires

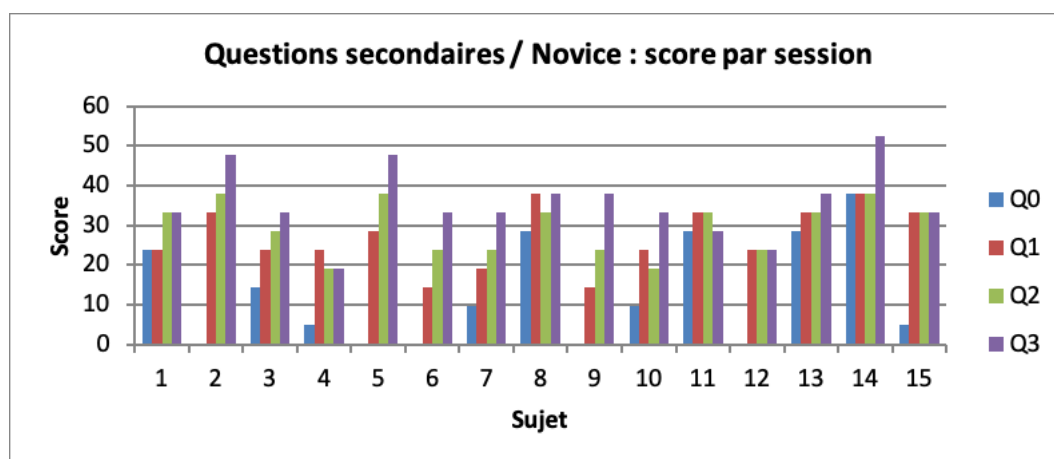
Note : les questions secondaires sont sur 21 points.

B.2.1 Groupe Novice

— Moyenne et écart-type des scores

	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
novice	12,7	27,0	29,5	35,6
écart-type	13,3	7,8	6,8	8,8

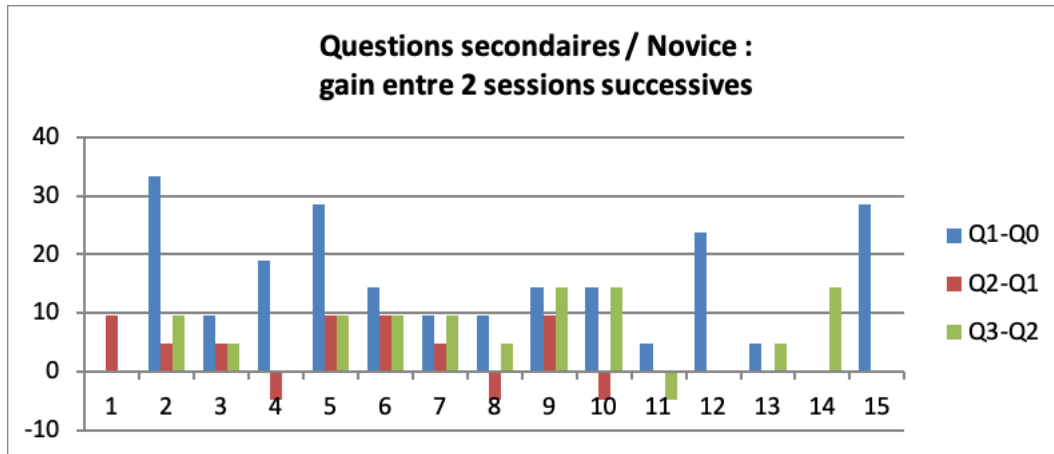
— Tracé



— Moyenne et écart-type des effets

	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
novice	14,3	2,5	6,0
écart-type	10,5	5,4	6,1

— Tracé



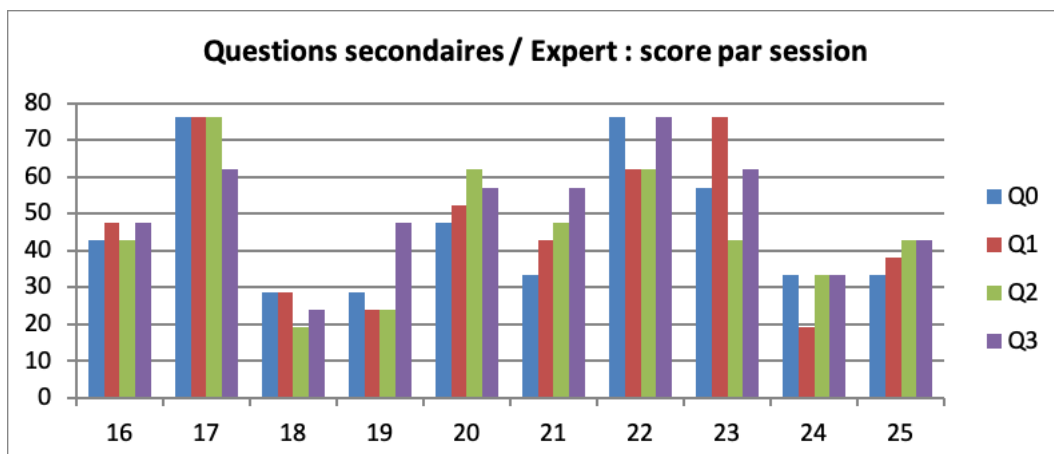
B.2.2 Groupe Expert

— Moyenne et écart-type des scores

	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
expert	45,7	46,7	45,2	51,0
écart-type	18,4	20,3	17,7	15,2

A noter : grande variabilité entre les experts.

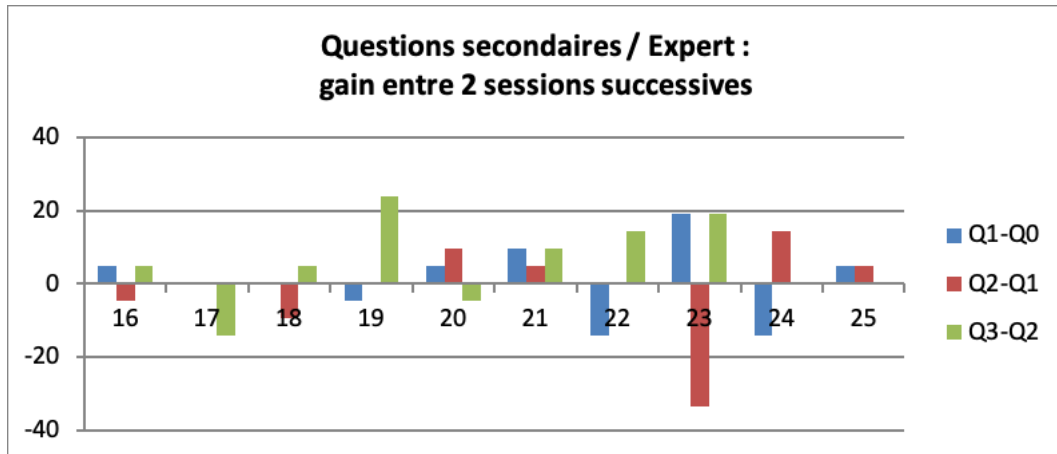
— Tracé



— Moyenne et écart-type des effets

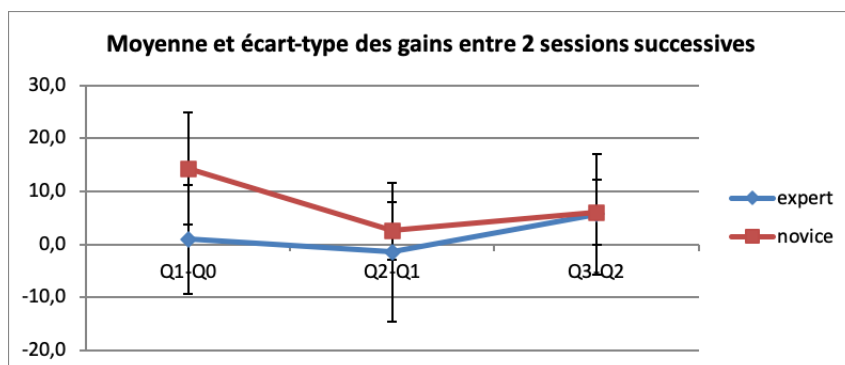
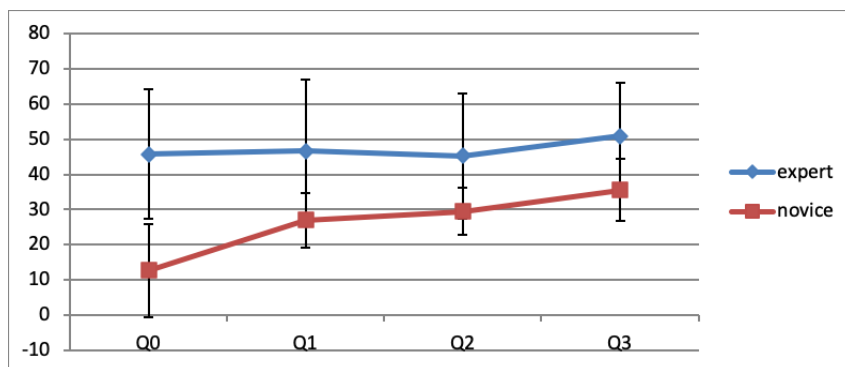
	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
expert	1,0	-1,4	5,7
écart-type	10,2	13,1	11,4

— Tracé



B.2.3 Comparaison des groupes

— Tracés



— Analyse des scores

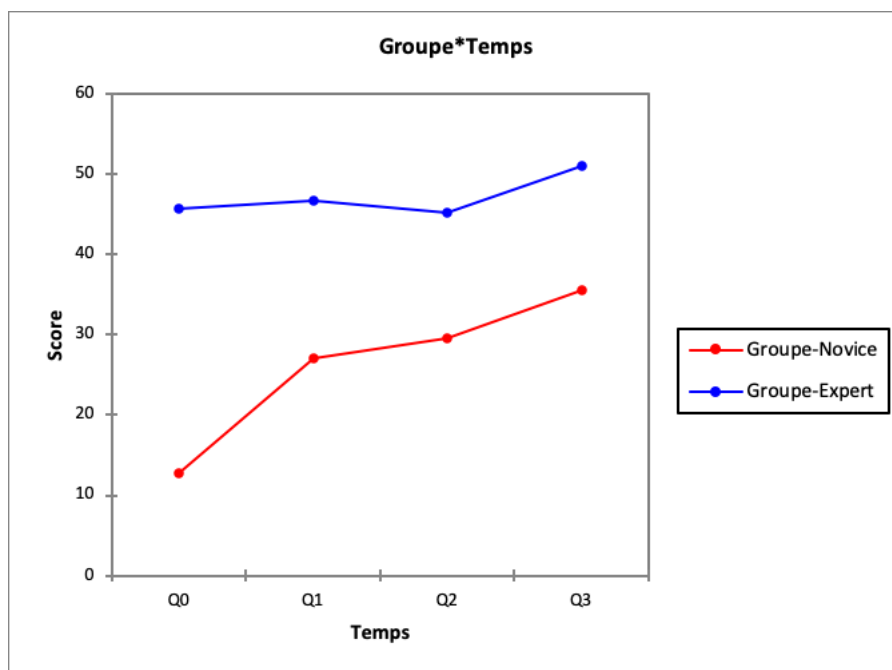
Nous appliquons une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes.

La variable dépendante (à expliquer) est le score.

Les variables explicatives sont le facteur « temps » (i.e. la session : Q₀ /Q₁ /Q₂ /Q₃) et le facteur groupe (Expert/Novice).

Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Groupe	1	92	18,945	< 0,0001
Temps	3	92	18,692	< 0,0001
Groupe × Temps	3	92	7,215	0,0002

Il y a un effet significatif de l'interaction Groupe × Temps ce qui signifie que l'effet du temps (de la session) n'est pas le même en fonction des groupes :

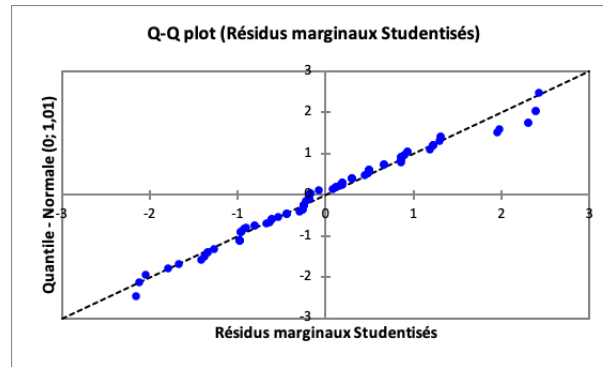


Il faut donc analyser l'effet du temps sur chaque groupe séparément.

Vérification du modèle : on trace Le Q-Q plot des résidus normalisés de Student.

A part 3 points extrêmes le tracé suit la diagonale ce qui signifie que les résidus sont approximativement gaussiens et donc que les hypothèses du modèle sont vérifiées.

Un test de normalité de Shapiro-Wilk rejette l'hypothèse que l'échantillon suit une loi normale (p=0,049) en raison de ces points.



Les 3 points extrêmes correspondent au sujet 22 : qui est à part car il a de très bons résultats.

Une analyse sans ce sujet confirme son influence : le test de Shapiro–Wilk n’est plus significatif ($p=0.232$).

Pour analyser l’effet du temps sur chaque groupe séparément, nous appliquons, pour chaque groupe, une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes et si les conditions ne sont pas vérifiées nous appliquons un test de Friedman.

La variable dépendante (à expliquer) est le score.

La variables explicative est le facteur « temps » (i.e. la session : $Q_0 / Q_1 / Q_2 / Q_3$).

Pour le groupe novice :

Le modèle mixte est vérifié.

Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Temps	3	56	27,939	< 0,0001

La différence entre les moyennes de sessions est significative ($p<0,0001$).

Quelles moyennes sont différentes ? Nous appliquons les tests post-hoc de Tukey (HSD).

Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%					
Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
Q ₃ vs Q ₀	22,857	2,592	2,648	< 0,0001	Oui
Q ₃ vs Q ₁	8,571	2,592	2,648	0,009	Oui
Q ₃ vs Q ₂	6,032	2,592	2,648	0,104	Non
Q ₂ vs Q ₀	16,825	2,592	2,648	< 0,0001	Oui
Q ₂ vs Q ₁	2,540	2,592	2,648	0,761	Non
Q ₁ vs Q ₀	14,286	2,592	2,648	< 0,0001	Oui
Valeur critique du d de Tukey : 3,745					

Groupe / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%					
Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
Novices vs Experts	5,873	2,046	1,995	0,005	Oui
Valeur critique du d de Tukey : 2,821					

Différence significative entre Q₃ et Q₀ , Q₁ ; entre Q₂ et Q₀ ; entre Q₁ et Q₀ .

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
Q ₃	35,556	A		
Q ₂	29,524	A	B	
Q ₁	26,984		B	
Q ₀	12,698			C

Pour le groupe expert :

Le modèle mixte est vérifié.

Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Temps	3	36	4,516	0,009

Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Temps	3	36	1,013	0,398

La différence entre les moyennes de sessions n'est pas significative ($p=0,398$).

B.2.4 Effets

Nous appliquons une ANOVA à mesures répétées en utilisant des modèles mixtes.

La variable dépendante (à expliquer) est le gain entre 2 sessions successives.

Les variables explicatives sont le facteur « temps » (i.e. les sessions : $Q_1 - Q_0 / Q_2 - Q_1 / Q_3 - Q_2$) et le facteur groupe (Expert/Novice).

Le modèle mixte est vérifié.

Tests de type III des effets fixes				
Effets	Num DDL	Den DDL	F	Pr > F
Groupe	1	69	4,929	0,002
Temps	2	69	4,973	0,025
Groupe × Temps	2	69	0,667	0,083

Pas d'effet d'interaction Groupe × Temps.

Un effet Groupe : les gains diffèrent entre les groupes et un effet Temps : les gains diffèrent en fonction des sessions.

Quelles sont les différences 2 à 2? Nous appliquons les tests post-hoc de Tukey (HSD).

Groupe / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%					
Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
novice vs expert	5,873	2,046	1,995	0,005	Oui
Valeur critique du d de Tukey : 2,821					

Les tests post-hoc montrent une différence de gains entre groupe Novice et groupe Expert.

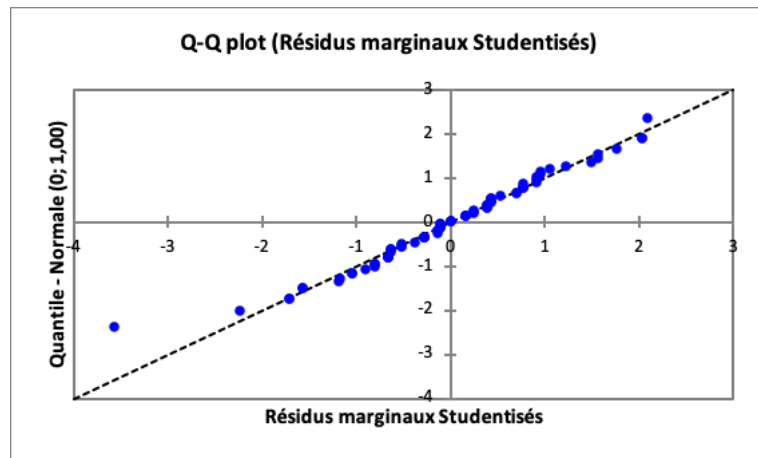
Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
novice	7,619	A	
expert	1,746		B

Temps / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%					
Contraste	Différence	Erreur standard	t	Pr > t	Significatif
$Q_1 - Q_0$ vs $Q_2 - Q_1$	7,063	2,505	2,396	0,017	Oui
$Q_1 - Q_0$ vs $Q_3 - Q_2$	1,746	2,505	2,396	0,766	Non
$Q_3 - Q_2$ vs $Q_2 - Q_1$	0,882	5,317	2,396	0,093	Non
Valeur critique du d de Tukey : 3,388					

Le gain $Q_1 - Q_0$ diffère significativement du gain $Q_2 - Q_1$.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
$Q_1 - Q_0$	7,619	A	
$Q_3 - Q_2$	5,873	A	B
$Q_2 - Q_1$	0,556		B

Vérification du modèle : on trace Le Q-Q plot des résidus normalisés de Student.



Le tracé suit la diagonale ce qui signifie que les résidus sont approximativement gaussiens et donc que les hypothèses du modèle sont vérifiées.

Un test de normalité de Shapiro–Wilk ne rejette pas l’hypothèse que l’échantillon suit une loi normale ($p=0.162$).

L’interaction Groupe \times Temps n’est pas significative $p=0,083$ mais p est proche de 0,05. Nous complétons donc l’analyse en séparant les groupes.

Pour analyser l’effet du temps sur chaque groupe séparément, nous appliquons, pour chaque groupe, un test de Friedman.

Pour le groupe novice :

Test de Friedman	
Q (Valeur observée)	12,218
Q (Valeur critique)	5,991
p-value (bilatérale)	0,001
alpha	0,05

La différence entre les gains moyens de sessions est significative ($p=0,001$).

Quels gains moyens sont différents ? Nous appliquons les tests post-hoc de Nemenyi.

p-values			
	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
$Q_1 - Q_0$	1	0,001	0,028
$Q_2 - Q_1$	0,001	1	0,273
$Q_3 - Q_2$	0,028	0,273	0
Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0167			

Différences significatives			
	$Q_1 - Q_0$	$Q_2 - Q_1$	$Q_3 - Q_2$
$Q_1 - Q_0$	Non	Oui	Non
$Q_2 - Q_1$	Oui	Non	Non
$Q_3 - Q_2$	Non	Non	Non

$Q_1 - Q_0$ diffère de $Q_2 - Q_1$.

Pour le groupe expert :

Test de Friedman	
Q (Valeur observée)	0,500
Q (Valeur critique)	5,991
p-value (bilatérale)	0,797
alpha	0,05

Pas de différence significative entre les gains ($p=0,797$).

B.2.5 Corrélations entre les scores

Les corrélations de Pearson sont calculées entre les scores des différentes sessions. Pour tenir compte de la multiplicité des tests nous appliquons une correction de Bonferroni pour la significativité donc $p=0,008$ ($0,05/6$).

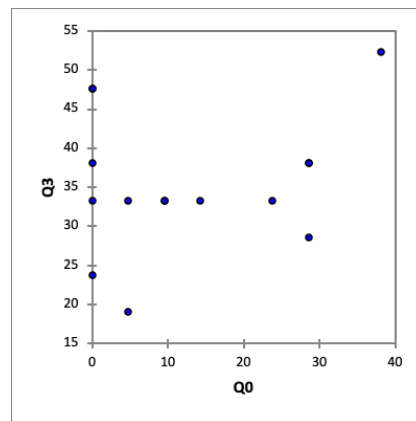
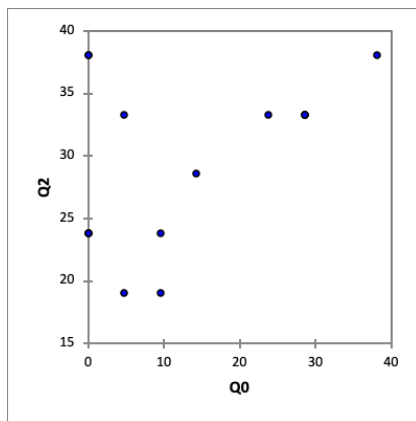
Groupe novice :

Matrice de corrélation (Pearson)				
Variables	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
Q_0	1	0,616	0,431	0,226
Q_1	0,616	1	0,737	0,411
Q_2	0,431	0,737	1	0,722
Q_3	0,226	0,411	0,722	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,008$

p-values				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	0	0,015	0,109	0,418
Q ₁	0,015	0	0,002	0,128
Q ₂	0,109	0,002	0	0,002
Q ₃	0,172	0,128	0,002	0

Q₀ avec Q₁ , Q₁ avec Q₂ , Q₂ avec Q₃ .

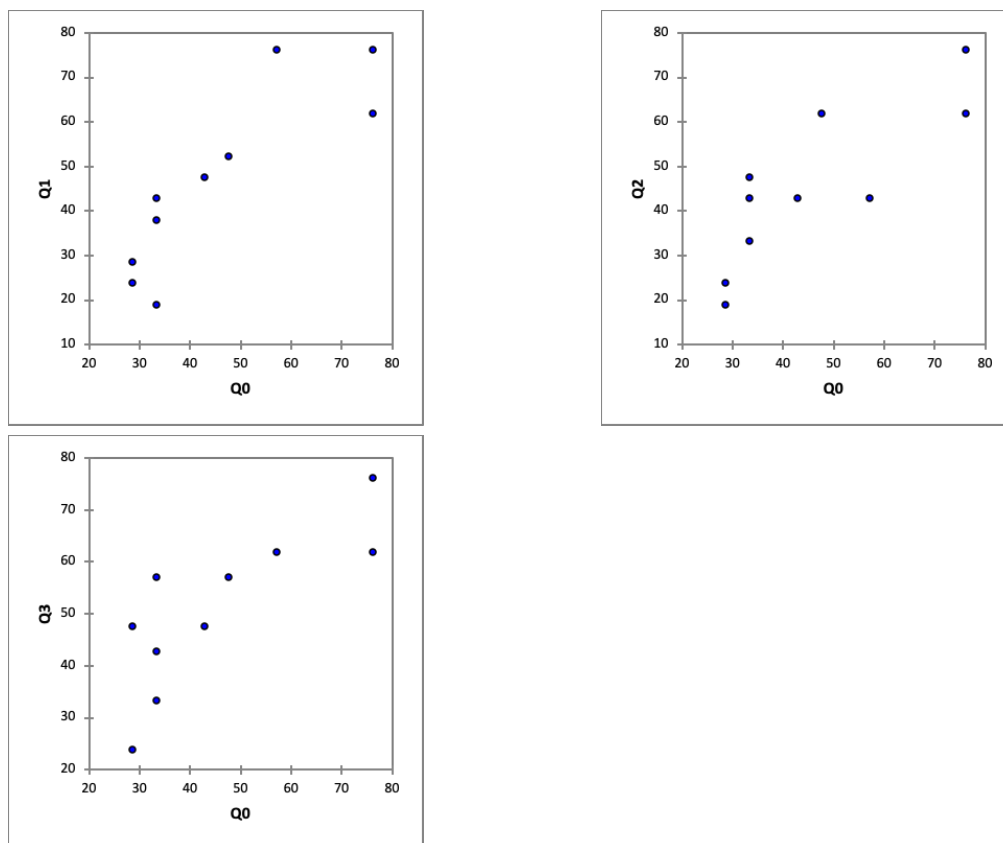


Groupe expert :

Matrice de corrélation (Pearson)				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	1	0,865	0,827	0,798
Q ₁	0,865	1	0,771	0,777
Q ₂	0,827	0,771	1	0,770
Q ₃	0,798	0,777	0,770	1

p-values				
Variables	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Q ₀	0	0,001	0,003	0,006
Q ₁	0,001	0	0,009	0,008
Q ₂	0,003	0,009	0	0,009
Q ₃	0,006	0,008	0,009	0

Corrélation entre tous les scores. Ceci est lié au fait que les scores varient peu d'une session à l'autre.



B.3 Résumé

B.3.1 Remarques

- Les experts sont très variables (non homogènes) : cf. 18 et 22.
- Un écart statistiquement significatif ne signifie pas un écart intéressant du point de vue de l'apprentissage
- Un écart non statistiquement significatif ne signifie pas un écart inintéressant du point de vue de l'apprentissage
- L'effet d'apprentissage étudié est cumulatif : à Q_2 on ne peut pas dissocier l'effet d'apprentissage à Q_1 ...

B.3.2 Résultats

Questions principales

Groupe	Moyenne (écart-type) Gain moyen (écart-type)		
	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Novice	19,6 (12,1)	21,4 (8,6)	24,3 (9,8)
	+10 (10,1)	+1,8 (6,7)	+2,9 (5)
Expert	43,2 (27)	44,1 (26,6)	45,6 (25,5)
	+4,4 (7,2)	+0,9 (5)	+1,5 (4,9)

- Novice :
 - grand effet moyen de l'outil 1 (gain moyen 10) puis peu d'effet moyen des outils ajoutés.
 - Peu de variabilité à Q₂ et Q₃ : plafonnement des scores.
 - Le score moyen maximal n'est pas très élevé : 24,3/100
 - Différence significative du score moyen Q₀ avec Q₁, Q₂ et Q₃ mais pas entre les autres sessions : l'effet principal de l'apprentissage est réalisé avec l'outil 1.
 - Au niveau individuel : des variations de gain important (ex. Q₁ - Q₀ min=0 max=26,4).
 - Expert :
 - Peu d'effet moyen des outils.
 - Variabilité importante (ex. Q₀ min=5,8 max=94,1)
 - Le score moyen maximal est moyen : 45,6/100
 - Différence significative du score moyen Q₀ avec Q₃ mais pas entre les autres sessions : l'effet moyen cumulé des outils est de 6,8.
 - Effet d'interaction **Groupe** × **Session** : l'effet de la session donc de l'apprentissage n'est pas le même entre les groupes.
 - Les gains du groupe Novice sont supérieurs en moyenne mais non significativement (manque de puissance statistique) à ceux du groupe Expert.
 - En moyenne, les gains Q₁ - Q₀ diffèrent significativement de Q₂ - Q₁ et Q₃ - Q₂.
- L'analyse séparée des groupes montre un effet pour le groupe Novice mais pas Expert.

Questions secondaires

Groupe	Moyenne (écart-type) Gain moyen (écart-type)			
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Novice	12,7 (13,3)	27,0 (7,8) +14,3 (10,5)	29,5 (6,8) +2,5 (5,4)	35,6 (8,8) +6,0 (6,1)
Expert	45,7 (18,4)	46,7 (20,3) +1,0 (10,2)	45,2 (17,7) -1,4 (13,1)	51,0 (15,2) +5,7 (11,4)

- Novice :
 - grand effet moyen de l'outil 1 (gain moyen 14,3) puis effet moyen des outils ajoutés.
 - Peu de variabilité à Q₂ et Q₃ : plafonnement des scores.
 - Le score moyen maximal est plus élevé que pour les questions principales : 35,6/100
 - Différence significative du score moyen Q₀ avec Q₁, Q₂ et Q₃ et entre Q₃ et Q₁ mais pas entre les autres sessions : l'effet principal de l'apprentissage est réalisé avec l'outil 1 puis l'ajout des autres outils le renforce.
 - Au niveau individuel : des variations de gain important (ex. Q₁ - Q₀ min=0 max=33).
- Expert :
 - Peu d'effet moyen des outils.
 - Variabilité importante (ex. Q₀ min=28,5 max=76,1)
 - Le score moyen maximal est moyen : 46,7/100
 - Pas de différence significative des scores moyens entre les sessions.
- Effet d'interaction **Groupe** × **Session** : l'effet de la session donc de l'apprentissage n'est pas le même entre les groupes.
- Les gains du groupe Novice sont supérieurs en moyenne significativement à ceux du groupe Expert.
- En moyenne, les gains Q₁ - Q₀ diffèrent significativement de Q₂ - Q₁.

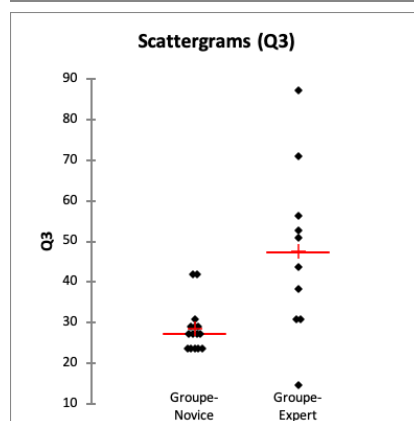
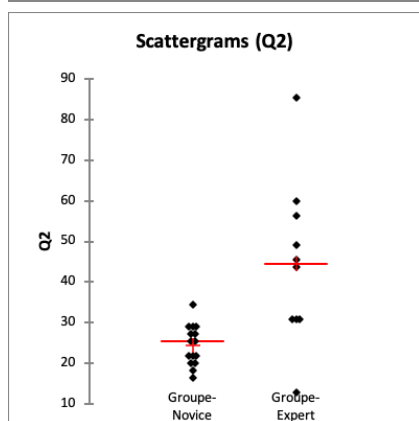
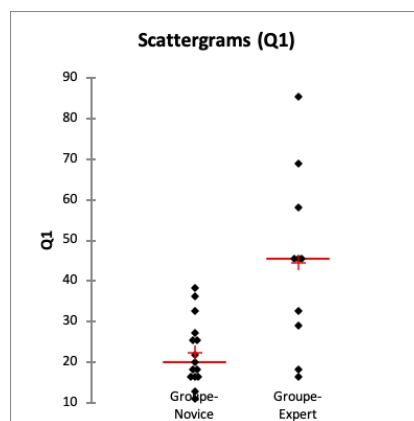
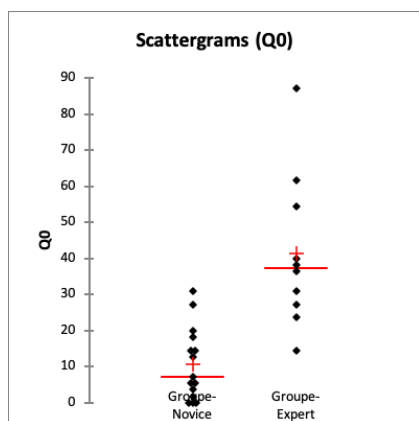
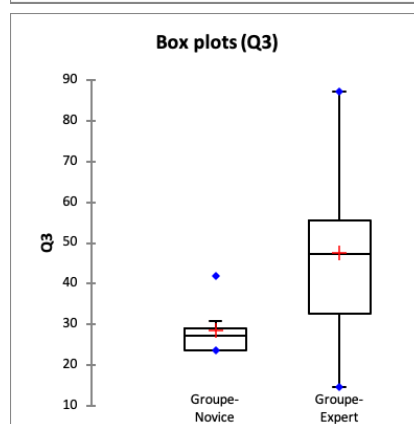
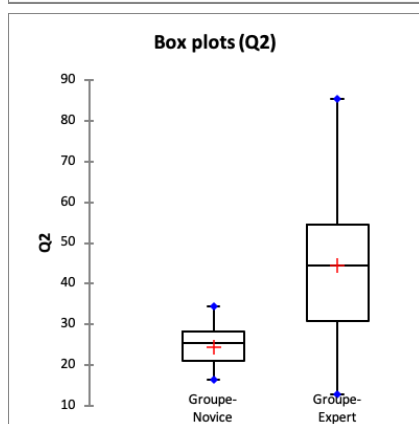
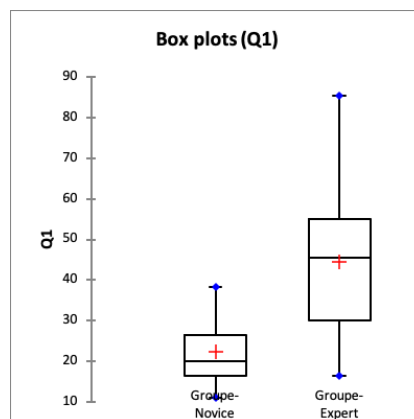
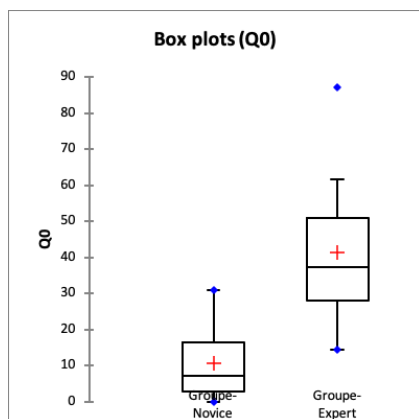
L'analyse séparée des groupes montre un effet pour le groupe Novice mais pas Expert.

B.4 Statistiques descriptives

B.4.1 Totalité des questions

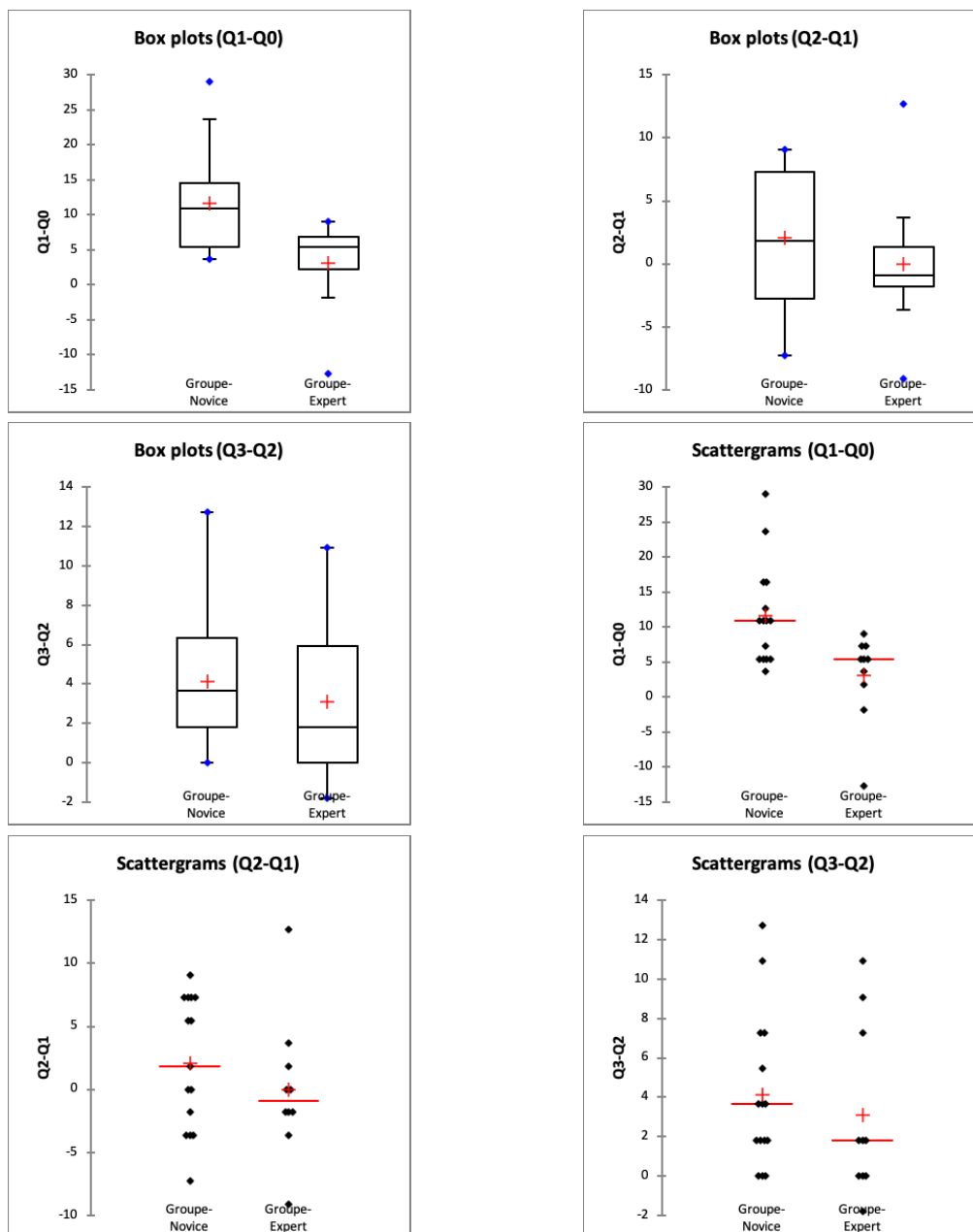
Scores

Stat	Q ₀		Q ₁		Q ₂		Q ₃	
	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert
Obs.	15	10	15	10	15	10	15	10
Val. manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0
Min	0,000	14,545	10,909	16,364	16,364	12,727	23,636	14,545
Max	30,909	87,273	38,182	85,455	34,545	85,455	41,818	87,273
1er Quartile	2,727	28,182	16,364	30,000	20,909	30,909	23,636	32,727
Médiane	7,273	37,273	20,000	45,455	25,455	44,545	27,273	47,273
3ème Quartile	16,364	50,909	26,364	55,000	28,182	54,545	29,091	55,455
Moyenne	10,788	41,455	22,424	44,545	24,485	44,545	28,606	47,636
Ecart-type (n-1)	9,993	21,286	8,323	21,940	4,997	20,124	5,890	21,043
Borne inf. moyenne (95%)	5,254	26,227	17,815	28,851	21,718	30,150	25,344	32,583
Borne sup. moyenne (95%)	16,322	56,682	27,033	60,240	27,252	58,941	31,868	62,690



Gains entre 2 sessions successives

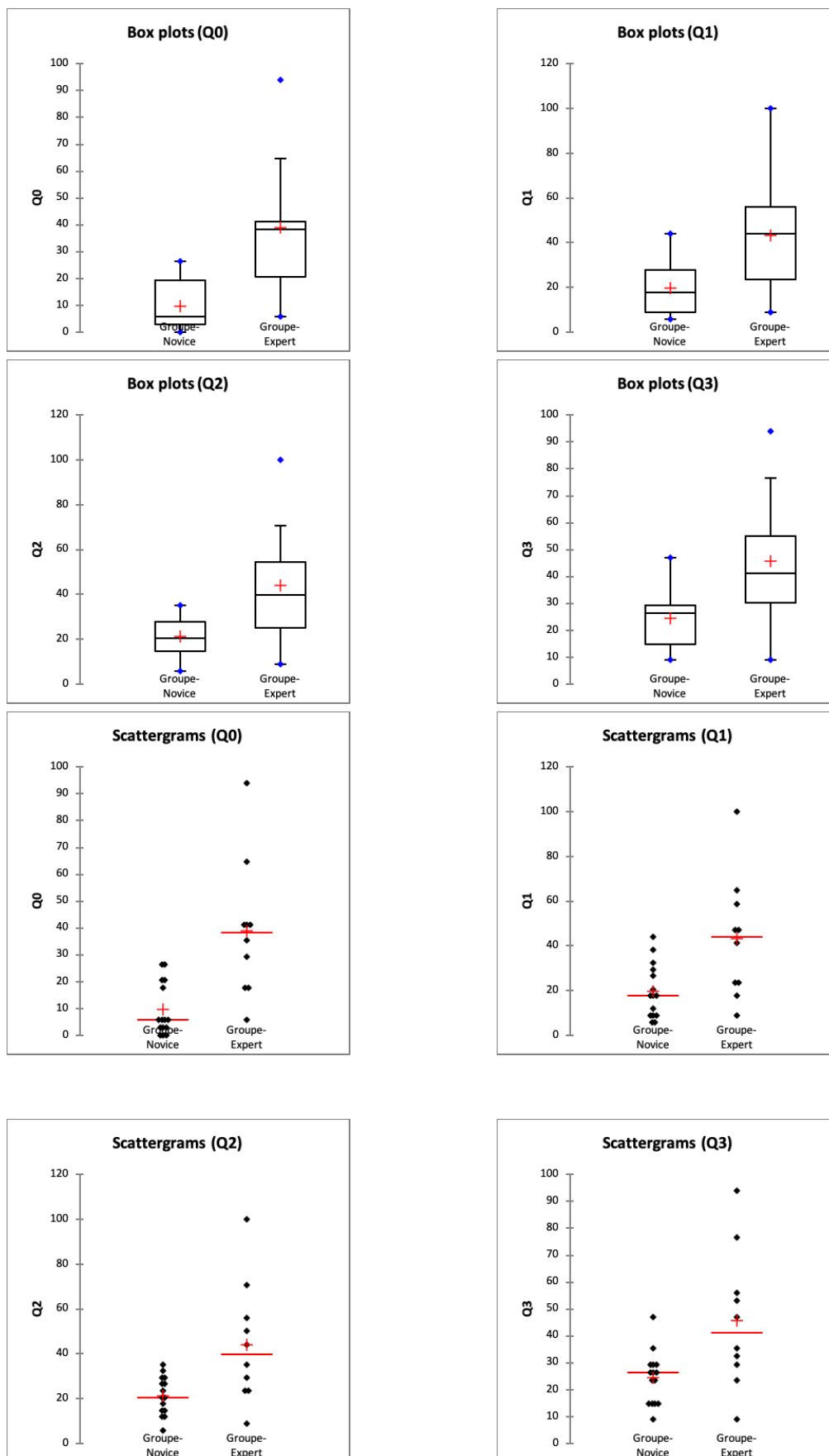
Statistique	Q ₁ -Q ₀		Q ₂ -Q ₁		Q ₃ -Q ₂	
	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert
Nb. d'observations	15	10	15	10	15	10
Nb. de valeurs manquantes	0	0	0	0	0	0
Minimum	3,636	-12,727	-7,273	-9,091	0,000	-1,818
Maximum	29,091	9,091	9,091	12,727	12,727	10,909
1er Quartile	5,455	2,273	-2,727	-1,818	1,818	0,000
Médiane	10,909	5,455	1,818	-0,909	3,636	1,818
3ème Quartile	14,545	6,818	7,273	1,364	6,364	5,909
Moyenne	11,636	3,091	2,061	0,000	4,121	3,091
Ecart-type (n-1)	7,234	6,359	5,273	5,620	3,916	4,375
Borne inf. de la moyenne (95%)	7,630	-1,458	-0,859	-4,021	1,953	-0,038
Borne sup. de la moyenne (95%)	15,642	7,640	4,980	4,021	6,290	6,220



B.4.2 Questions principales

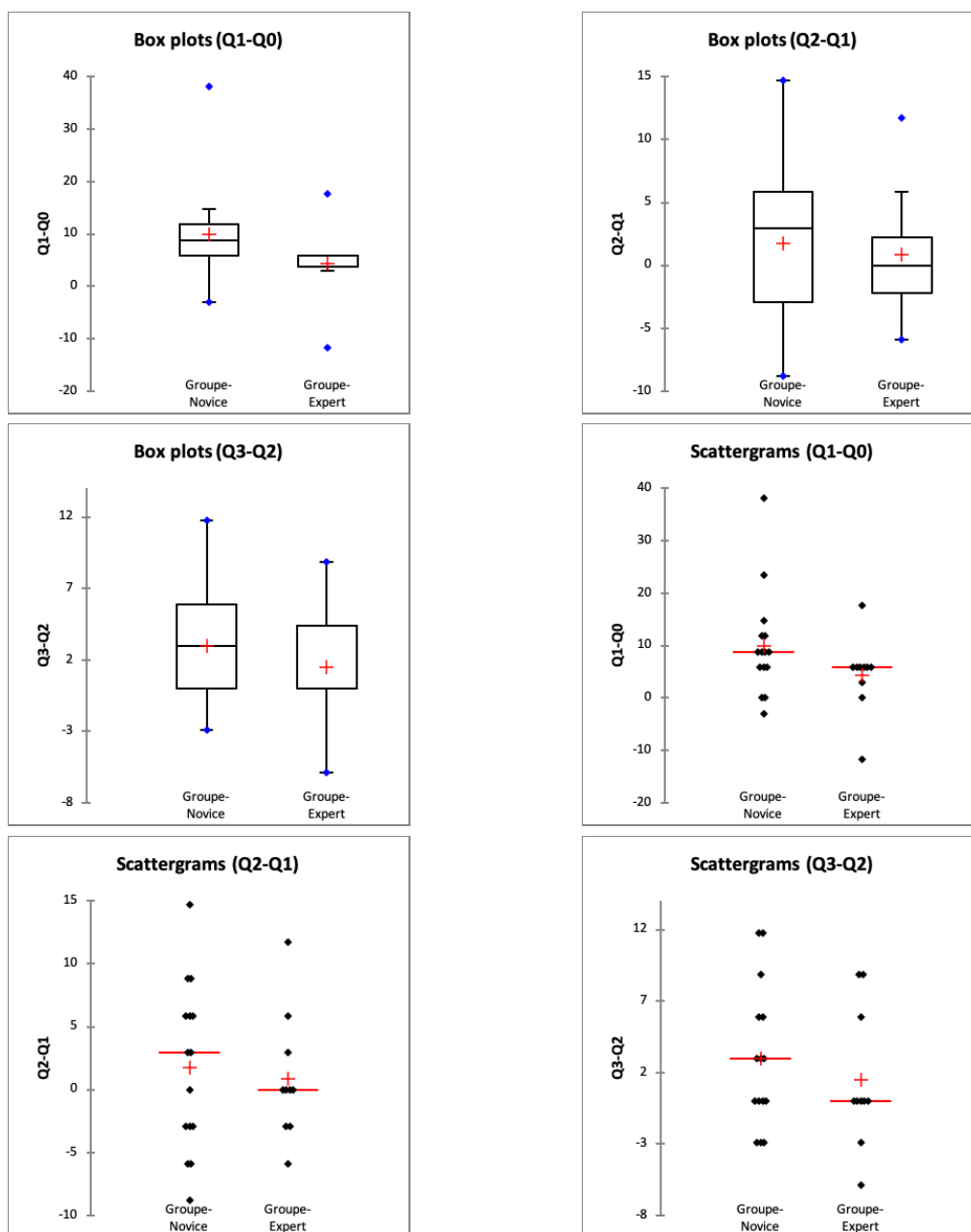
Scores

Stat	Q ₀		Q ₁		Q ₂		Q ₃	
	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert
Obs.	15	10	15	10	15	10	15	10
Val. manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0
Min	0,000	5,882	5,882	8,824	5,882	8,824	8,824	8,824
Max	26,471	94,118	44,118	100,000	35,294	100,000	47,059	94,118
1er Quartile	2,941	20,588	8,824	23,529	14,706	25,000	14,706	30,147
Médiane	5,882	38,235	17,647	44,118	20,588	39,706	26,471	41,176
3ème Quartile	19,118	41,176	27,941	55,882	27,941	54,412	29,412	55,147
Moyenne	9,608	38,824	19,608	43,235	21,373	44,118	24,314	45,588
Ecart-type (n-1)	9,784	25,445	12,110	27,029	8,573	26,633	9,784	25,500
Borne inf. moyenne (95%)	4,189	20,621	12,902	23,900	16,625	25,065	18,895	27,347
Borne sup. moyenne (95%)	15,026	57,026	26,314	62,571	26,120	63,170	29,732	63,830



Gains entre 2 sessions successives

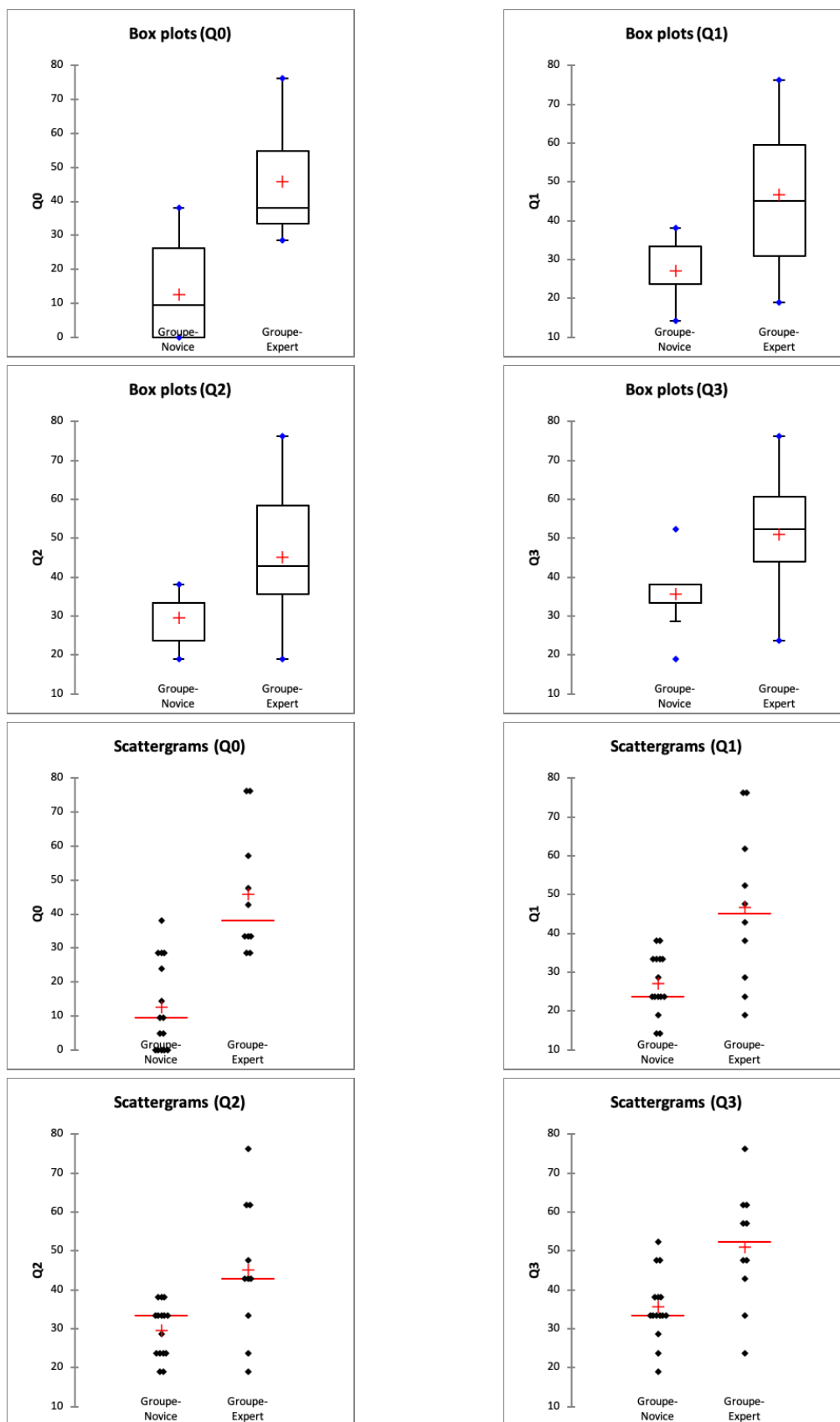
Statistique	Q ₁ -Q ₀		Q ₂ -Q ₁		Q ₃ -Q ₂	
	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert
Obs	15	10	15	10	15	10
Val. manquantes	0	0	0	0	0	0
Min	-2,941	-11,765	-8,824	-5,882	-2,941	-5,882
Max	38,235	17,647	14,706	11,765	11,765	8,824
1er Quartile	5,882	3,676	-2,941	-2,206	0,000	0,000
Médiane	8,824	5,882	2,941	0,000	2,941	0,000
3ème Quartile	11,765	5,882	5,882	2,206	5,882	4,412
Moyenne	10,000	4,412	1,765	0,882	2,941	1,471
Ecart-type (n-1)	10,115	7,238	6,651	5,009	4,971	4,853
Borne inf. de la moyenne (95%)	4,398	-0,766	-1,919	-2,701	0,188	-2,001
Borne sup. de la moyenne (95%)	15,602	9,589	5,448	4,465	5,694	4,942



B.4.3 Questions secondaires

Scores

Stat	Q ₀		Q ₁		Q ₂		Q ₃	
	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert
Obs.	15	10	15	10	15	10	15	10
Val. manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0
Min	0,000	28,571	14,286	19,048	19,048	19,048	19,048	23,810
Max	38,095	76,190	38,095	76,190	38,095	76,190	52,381	76,190
1er Quartile	0,000	33,333	23,810	30,952	23,810	35,714	33,333	44,048
Médiane	9,524	38,095	23,810	45,238	33,333	42,857	33,333	52,381
3ème Quartile	26,190	54,762	33,333	59,524	33,333	58,333	38,095	60,714
Moyenne	12,698	45,714	26,984	46,667	29,524	45,238	35,556	50,952
Ecart-type (n-1)	13,307	18,402	7,776	20,303	6,782	17,711	8,793	15,233
Borne inf. moyenne (95%)	5,329	32,550	22,678	32,143	25,768	32,568	30,686	40,055
Borne sup. moyenne (95%)	20,068	58,878	31,290	61,190	33,280	57,908	40,425	61,850



Gains entre 2 sessions successives

Statistique	Q ₁ -Q ₀		Q ₂ -Q ₁		Q ₃ -Q ₂	
	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert
Profils						
Obs	15	10	15	10	15	10
Val. manquantes	0	0	0	0	0	0
Min	0,000	-14,286	-4,762	-33,333	-4,762	-14,286
Max	33,333	19,048	9,524	14,286	14,286	23,810
1er Quartile	7,143	-3,571	0,000	-3,571	0,000	0,000
Médiane	14,286	2,381	0,000	0,000	4,762	4,762
3ème Quartile	21,429	4,762	7,143	4,762	9,524	13,095
Moyenne	14,286	0,952	2,540	-1,429	6,032	5,714
Ecart-type (n-1)	10,495	10,238	5,359	13,099	6,095	11,402
Borne inf. de la moyenne (95%)	8,474	-6,371	-0,428	-10,799	2,657	-2,442
Borne sup. de la moyenne (95%)	20,098	8,276	5,508	7,942	9,407	13,871

