

**Titre:** Conception d'une interface adaptative en réalité augmentée pour gérer des systèmes autonomes dans le déroulement de missions critiques  
Title:

**Auteur:** Dany Naser Addin  
Author:

**Date:** 2020

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Naser Addin, D. (2020). Conception d'une interface adaptative en réalité augmentée pour gérer des systèmes autonomes dans le déroulement de missions critiques [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/5559/>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/5559/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Benoît Ozell  
Advisors:

**Programme:** Génie informatique  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Conception d'une interface adaptative en réalité augmentée pour gérer des  
systèmes autonomes dans le déroulement de missions critiques**

**DANY NASER ADDIN**

Département de génie informatique et génie logiciel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
génie informatique

Décembre 2020

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**  
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Conception d'une interface adaptative en réalité augmentée pour gérer des systèmes autonomes dans le déroulement de missions critiques**

présenté par **Dany NASER ADDIN**  
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Giovanni BELTRAME**, président  
**Benoît OZELL**, membre et directeur de recherche  
**Michel DESMARAIS**, membre

## DÉDICACE

*À tous mes amis du laboratoire,*

*À la team sushi, grande équipe depuis notre arrivée ici en 2017,*

*À la colocation rue Saint-Zotique E,*

*À l'AÉCSP,*

*À la galérapateam,*

*À ma famille,*

*Une expérience que je n'oublierai jamais. . .*

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à adresser toute ma gratitude à mon directeur de recherche : M. Benoît Ozell qui m'a apporté beaucoup d'apprentissages et guidé tout au long de mes études et pour avoir orienté et enrichi mon travail. Je le remercie pour sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que son souci du détail, qui ont abouti à la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite ensuite remercier le partenaire industriel Humanitas Solutions ainsi que l'organisation MITACS que ce soit sur le plan financier ou sur le plan humain. L'ensemble du personnel du partenaire industriel m'a soutenu et aidé pendant toute la période de la maîtrise notamment Abdo Shabah et Luca Gianoli. Ils m'ont permis de concrétiser ce projet et d'apprendre les valeurs du milieu professionnel et d'une forte cohésion de groupe pendant tout le projet.

Je souhaite également remercier l'ensemble de mes collègues de laboratoire, avec qui j'ai partagé beaucoup de temps de travail et de discussion pendant la recherche. Je remercie ma famille de France ainsi que tous mes amis de France et de Montréal qui m'ont soutenu et apporté énormément de motivation durant l'ensemble de la maîtrise, dans les périodes difficiles incluant notre ère de pandémie.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour avoir passé du temps à l'examen de ce projet ainsi et pour leurs retours constructifs.

Un merci également aux 24 participants qui ont expérimenté une partie du projet.

Je souhaite enfin remercier l'ensemble du corps professoral et administratif de Polytechnique Montréal de m'avoir suivi et accompagné pendant ces deux ans et m'avoir offert la possibilité de réaliser ce projet et d'enrichir mes connaissances, ainsi que le milieu associatif composé de plusieurs comités où j'ai pu faire de multiples connaissances et grandir durant tout le long de ce projet.

Toutes ces personnes ont grandement impacté sur la concrétisation et la réussite de cette maîtrise ainsi que sur la conception de ce mémoire et je les remercie du fond du cœur.

## RÉSUMÉ

Dans une situation critique, de nombreux humains risquent leur vie pour en sauver d'autres. Les technologies innovantes pourraient grandement améliorer la conscience de la situation des acteurs de l'urgence, réduire le risque humain ainsi qu'augmenter la facilité de résolution des missions. Nous avons étudié cette idée en concevant une interface en réalité augmentée (RA) pour contrôler un essaim de drones durant une situation d'urgence.

Durant ce travail, nous avons conçu cette interface pour gérer plusieurs drones et accroître la connaissance de la situation dans les situations critiques. L'essaim était composé de drones autonomes qui fournissaient un flux important d'informations. Le projet consistait à comprendre les besoins humains dans les situations d'urgence et concevoir une application AR pour un visiocasque.

Nous nous sommes concentrés sur la situation et les besoins du SIM (Service de sécurité incendie de Montréal). Nous avons développé une solution qui conjointement avec un planificateur de mission dirige l'essaim fonctionnant sous l'infrastructure développée par le partenaire industriel. Nous avons ensuite mis en place une simulation d'urgence avec un bâtiment de grande hauteur en feu où les participants devaient comprendre la situation en utilisant le visiocasque AR.

Pour tester notre technologie et valider nos hypothèses, nous avons conçu une simulation stressante et difficile pour être testée avec des gens de Polytechnique Montréal. Nous comparons l'efficacité d'un ordinateur basique et d'un visiocasque de réalité augmentée afin d'établir une comparaison et de mesurer l'efficacité de la RA. Nous terminons en expliquant que le casque de RA était moins efficace qu'un ordinateur dû notamment à la toute première utilisation de cet outil. Cependant, le visiocasque montre des résultats proches de l'ordinateur et la technologie a été appréciée par tous les participants. Nous avons constaté une amélioration avec le casque presque similaire à celle de l'ordinateur concluant que la réalité augmentée pourrait, avec plus de formation et de pratique, améliorer les conditions des situations d'urgence.

La contribution des technologies innovantes dans les situations critiques est vraiment émergente de nos jours. Leur intégration permettra d'améliorer les conditions des sauveteurs, d'accélérer la prise de décision et ainsi réduire les risques humains dans le milieu de l'urgence pour l'avenir.

## ABSTRACT

In critical situations, many humans risk their lives to save others. Innovative technologies could greatly improve the situational awareness of emergency responders, reduce human risk and increase the resolution's mission. We investigated this idea by designing an augmented reality (AR) interface to control a swarm of drones during an emergency situation.

During this work, we designed an interface to manage multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) and increase situational awareness in critical situations. The swarm was composed of autonomous UAVs that provided a significant flow of information. The project consisted of understanding human needs in emergency situations and designing an AR application for a headset.

We focused on the situation and the needs of the SIM (Montreal Fire Safety Service). We developed a solution that, simultaneously with a mission planner, manages drones in the field operating with the infrastructure developed by the industrial partner. We then set up an emergency simulation with a high-rise building on fire where participants had to understand the situation using AR headset.

To test our technology and validate our hypotheses, we tested our solution with people from Polytechnique Montreal during a stressful and difficult simulation. We compare the effectiveness of a basic computer and an augmented reality headset to compare and measure the effectiveness of AR. We concluded by explaining that the AR headset was less effective than a computer, due in part to the very first use of this tool. However, the headset shows results close to the basic computer, and the technology was appreciated by all participants. We saw an improvement with the headset almost similar to the computer. Our results showed that augmented reality could, with more training and practice, improve conditions in emergency situations.

The contribution of innovative technologies in critical situations is really emerging nowadays. Working on their integration will improve the conditions for rescuers, speed up decision-making and thus reduce human risks in the emergency environment for the future.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE . . . . .	iii
REMERCIEMENTS . . . . .	iv
RÉSUMÉ . . . . .	v
ABSTRACT . . . . .	vi
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	vii
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	x
LISTE DES FIGURES . . . . .	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .	xiii
LISTE DES ANNEXES . . . . .	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .	4
2.1 Définition de la réalité augmentée . . . . .	4
2.2 Système autonome . . . . .	6
2.3 Interactions liées aux visiocasques . . . . .	7
2.4 Conception de l'interface utilisateur . . . . .	9
2.5 Expérience de l'utilisateur . . . . .	11
2.6 Téléopérations sur des systèmes robotiques . . . . .	12
2.7 Planification de mission . . . . .	15
2.8 Le domaine des situations d'urgence . . . . .	16
2.9 Simulation d'une mission . . . . .	18
2.10 Réalité augmentée en milieu extérieur . . . . .	19
2.11 Contexte de la recherche . . . . .	21
2.12 Objectifs . . . . .	22
2.12.1 Technologie mise en place . . . . .	22
2.12.2 But . . . . .	23
2.12.3 Objectifs spécifiques . . . . .	23

2.13 Hypothèses . . . . .	24
CHAPITRE 3 ARTICLE 1 : DESIGN AND TEST OF AN ADAPTIVE AUGMENTED REALITY INTERFACE TO MANAGE SYSTEMS TO ASSIST CRITICAL MIS- SIONS. . . . .	25
3.1 Abstract . . . . .	25
3.2 Introduction . . . . .	25
3.3 Related work . . . . .	26
3.3.1 Emergency Response's Strategies . . . . .	26
3.3.2 Mixed Reality Technologies . . . . .	27
3.4 Methodology and Experimentation . . . . .	29
3.4.1 Firefighters of Montréal (SIM) . . . . .	29
3.4.2 Objectives . . . . .	29
3.4.3 Proposed Technology . . . . .	31
3.4.4 Context of the Simulation . . . . .	35
3.4.5 Evaluation . . . . .	38
3.5 Results . . . . .	40
3.6 Discussion . . . . .	42
3.7 Conclusion . . . . .	47
3.8 Acknowledgments . . . . .	48
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE COMPLÉMENTAIRE . . . . .	49
4.1 Description du système . . . . .	49
4.1.1 Réseau HEAVEN . . . . .	49
4.1.2 Essaim de drones autonomes . . . . .	49
4.1.3 Planificateur de mission . . . . .	50
4.1.4 Simulateur . . . . .	50
4.1.5 Application de réalité augmentée . . . . .	51
4.2 Expérimentation en terrain réel . . . . .	52
4.3 Simulation d'urgence . . . . .	53
4.3.1 Étude sur les différents choix de simulation . . . . .	53
4.3.2 Adaptation de l'application pour l'expérience . . . . .	56
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE . . . . .	59
5.1 Capacités du Hololens 1.0 . . . . .	59
5.2 Capacités du Magic Leap 1 . . . . .	60
5.3 Bonnes pratiques en réalité augmentée . . . . .	61

CHAPITRE 6 CONCLUSION . . . . .	63
6.1 Synthèse des travaux . . . . .	63
6.2 Améliorations futures . . . . .	64
RÉFÉRENCES . . . . .	65
ANNEXES . . . . .	73

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Cas d'applications pour visiocasque en réalité augmentée par Klinker et al. [38] . . . . .	6
Tableau 2.2	Types d'entrées pour interagir avec un visiocasque de réalité augmentée	8
Tableau 2.3	Types de retour avec un casque de réalité augmentée . . . . .	9
Tableau 2.4	Regroupements d'outils en réalité augmentée pour assister un humain en mission tactique (Argenta et al. [5]) . . . . .	11
Tableau 2.5	Catégories et description du formulaire NASA-TLX . . . . .	17
Tableau 3.1	Firefighters' questions on fire emergency in HRB . . . . .	30
Tableau 3.2	List of widgets of the application and resume of them . . . . .	34
Tableau 3.3	Evaluation of participants' feedback results during experience . . . . .	39
Tableau 3.4	Personalized questionnaire for our experiment . . . . .	41
Tableau 3.5	Criteria for validating the assumptions made . . . . .	41
Tableau 4.1	Avantages et désavantages de la virtualisation complète de la logistique	54
Tableau 4.2	Avantages et désavantages de l'environnement virtuel affiché avec l'utilisation de la technologie . . . . .	55
Tableau 4.3	Avantages et désavantages de la virtualisation complète de la logistique	56
Tableau B.1	Formulaire personnalisé pour l'expérience . . . . .	88

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Continuum de la réalité virtuelle Milgram et al. [47] . . . . .	4
Figure 2.2	Exemple de drone . . . . .	7
Figure 2.3	Gestes reconnaissables par le visiocasque Magic Leap One Leap [43] .	10
Figure 2.4	Provenant de Brizzi et al. [10] montrant son expérimentation pour contrôler un robot à l'aide d'un affichage immersif. . . . .	14
Figure 2.5	Visiocasque fermé Oculus Rift (a), Écran géant incurvé de Elumens (b) et écran simple (c) . . . . .	19
Figure 2.6	Hololens 1.0 avec filtre de réduction lumineuse par Gaydhani [29] . .	20
Figure 2.7	Hololens 2.0 Microsoft [46] . . . . .	21
Figure 2.8	CAVE Copyright 1997 <i>Innovative Computer Applications</i> . . . . .	23
Figure 3.1	Virtual Reality and Augmented Continuum Milgram . . . . .	27
Figure 3.2	Diagram representative of a use case with the system to improve situational awareness . . . . .	31
Figure 3.3	Representation of the sending and receiving of information in augmented reality to the autonomous system in action . . . . .	32
Figure 3.4	Image of different widgets from the application (a) Main menu (b) Notification (c) Situational compass (d) Mission creation (e) UAV data (f) SIM form (g) 3D model (h) UAV List (i) Improved Visibility . .	33
Figure 3.5	The Square Victoria Square built by the Industrial Partner Humanitas Solutions . . . . .	34
Figure 3.6	Pictures of virtual environment (a) HRB in fire (b) Sample of virtual people in help . . . . .	36
Figure 3.7	Complete Infrastructure of the Simulation . . . . .	38
Figure 3.8	Experimentation with Magic Leap 1 (a) User interaction during the mission (b) Side view of the user during experience . . . . .	39
Figure 3.9	Box plot of missions' results by technology . . . . .	42
Figure 3.10	Details of missions report results . . . . .	43
Figure 3.11	Responses of personalized questionnaire . . . . .	43
Figure 4.1	Images provenant du planificateur de mission (a) Visualisation du parcours de l'essaim (b) Liste des drones . . . . .	51
Figure 4.2	Images provenant du planificateur de mission (a) Simulateur et réalité augmentée (b) RA sur Hololens 1.0 . . . . .	52
Figure 4.3	Images provenant de l'expérimentation en terrain réel . . . . .	53

Figure 4.4	Schéma des différentes configurations possibles pour l'expérience (a) Virtualisation complète (b) Technologie et simulation (c) Technologie et milieu réel . . . . .	54
Figure 4.5	Emplacement des informations pour chaque mission pendant l'expérience (a) Mission 1 (b) Mission 2 . . . . .	58
Figure A.1	Menu principal de l'utilisateur . . . . .	74
Figure A.2	Premier modèle d'un objet 3D interactif . . . . .	75
Figure A.3	Création d'un chemin pour les drones et la distance du dernier point vis-à-vis de l'utilisateur . . . . .	76
Figure A.4	Exemple de plusieurs types de notifications . . . . .	77
Figure A.5	Widget liste des drones . . . . .	79
Figure A.6	Fiche informative d'un drone . . . . .	81
Figure A.7	Menu des photos d'un drone . . . . .	81
Figure A.8	Boussole ainsi que la présence d'un drone proche de l'utilisateur . . . .	82
Figure A.9	Ajout d'une bulle lumineuse pour améliorer la visibilité des drones . .	83
Figure A.10	Outil du rapport de situation . . . . .	84
Figure C.1	Interface de la station de contrôle 2D . . . . .	92
Figure C.2	Interface en réalité augmentée avec widgets et superposition d'information sur la simulation . . . . .	94

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

UAV	Unmanned aerial vehicle
MAV	Micro air vehicle
UX	User experience
AR / RA	Augmented reality / Réalité augmentée
VR / RV	Virtual reality / Réalité virtuelle
MR / RM	Mixed reality / Réalité mixte
HRB / BHG	High-rise building / Bâtiment de grande hauteur
HMD	Head mounted display
SIM	Service de sécurité incendie de Montréal

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe A	LISTE DES OUTILS DE RÉALITÉ AUGMENTÉE IMPLÉMENTÉS	73
Annexe B	SCÉNARIO PRÉVU AVEC LES POMPIERS DU SIM . . . . .	85
Annexe C	INFORMATIONS FOURNIES AU PARTICIPANT POUR L'EXPÉRIENCE . . . . .	90
Annexe D	QUESTIONNAIRE PERSONNALISÉ SOUMIS AUX PARTICIPANTS DE L'EXPÉRIENCE . . . . .	95
Annexe E	RAPPORT DE MISSION POUR L'INCENDIE D'UN BGH DE 4 ÉTAGES . . . . .	101

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La réalité augmentée est une technologie qui fonctionne sous différents supports comme l'utilisation d'appareils mobiles (cellulaire) avec caméra ou d'un visiocasque permettant d'afficher des hologrammes. Ces représentations visuelles s'ajoutent à l'environnement réel pour apporter des informations supplémentaires et ainsi assister l'humain dans des tâches complexes.

Ce mémoire présente la conception d'une interface de contrôle d'un système autonome à l'aide d'un visiocasque en réalité augmentée afin d'améliorer les conditions de mission dans le milieu de l'urgence. Ce système autonome provenant du partenaire industriel est composé d'un ensemble de drones gérés par intelligence artificielle effectuant des tâches dans le but d'assister des personnes lors d'opérations d'urgence.

Notre but est de déterminer l'efficacité de la réalité augmentée avec l'utilisation d'un visiocasque sur le déroulement d'une mission d'urgence à l'aide d'un système autonome provenant du partenaire industriel. Nos objectifs pour atteindre ce but ont été d'analyser les systèmes fournis par le partenaire industriel (O.1), de créer une interface en réalité augmentée avec visiocasque pour gérer et comprendre les informations depuis un essaim de drones (O.2, O.3), de mettre en place une expérience de situation d'urgence (O.4, O.5) et d'évaluer les performances de notre interface en réalité augmentée dans cette expérience (O.6, O.7). Nous avons développé une application en réalité augmentée pour visiocasque pour contrôler un essaim de drones et mis en place une simulation d'une situation d'urgence pour notre application pour évaluer l'efficacité de notre application avec des personnes. Nous avons regroupé notre travail et nos résultats dans un article scientifique soumis au journal Elsevier Computer & Graphics.

Le milieu de l'urgence étant assez large, nous nous sommes concentrés sur le travail du Service de Sécurité Incendie de Montréal (SIM) afin de comprendre les besoins principaux de ces acteurs. Nous avons relevé trois notions importantes : la localisation en tout temps, l'évolution des flammes ainsi que l'optimisation de la compréhension de l'information. Nous avons donc réfléchi sur la conception de ces outils avec une infrastructure adéquate pour assister à la résolution de ces besoins. Notre technologie était composée d'un casque de réalité augmentée ainsi que d'un ordinateur tactile qui fonctionnait en symbiose. Les drones se connectaient au réseau et recevaient des ordres directement depuis le casque et la tablette tactile, la tablette étant le point relais entre les drones et le casque. La tablette permettait également de planifier des missions de passages pour les drones facilement depuis une interface en deux dimensions tandis que le visiocasque permettait une approche en trois dimensions permet-

tant de voir en échelle réelle le trajet des drones, leurs points de passage à l'avance et vérifier que leurs trajectoires sont valides dans le monde réel. Un ensemble de fonctionnalité a été construit et développé pour fonctionner en réalité augmentée sous forme d'outils. Notre partenaire industriel a travaillé sur l'ensemble des objets connectés pour créer un réseau ad hoc indépendant du réseau cellulaire et d'internet ainsi que la conception de l'application Android pour tablette tactile. De multiples représentations et définitions des outils se trouvent dans l'article. La majorité des tests et du fonctionnement ont été réalisés dans la virtualisation d'un environnement réel contenant des drones avec système d'exploitation virtualisés mis en place par notre partenaire industriel Humanitas Solutions. Les drones reçoivent les commandes depuis le casque et la tablette tactile et effectuent leur mission dans une simulation. Pour évaluer l'impact de la réalité augmentée, nous avions prévu de faire tester notre technologie avec le SIM pour avoir un retour depuis des personnes qui avaient connaissance du milieu de l'urgence. En temps de pandémie, il a fallu revoir certains aspects de notre expérience, mais nous avons eu la chance d'effectuer une expérience avec des personnes dans les locaux de Polytechnique Montréal. L'exercice a été revu, car les personnes venaient de tout milieu et n'avaient pas forcément de connaissance sur les situations de l'urgence. L'expérience représentait une situation d'urgence où un bâtiment de grande hauteur prenait feu et contenait des personnes blessées en danger. Quatre drones autonomes patrouillaient automatiquement autour du bâtiment depuis l'extérieur équipé de caméra pour envoyer un flux vidéo à l'utilisateur. Le participant équipé de notre casque de RA devait fournir dans un rapport les informations comprises dans une situation d'urgence à l'aide du retour vidéo de drones ainsi qu'à l'aide de plusieurs outils pour rapporter diverses informations sur la localisation d'un incendie et la position de personnes blessées à l'intérieur d'un bâtiment. Pour effectuer une analyse sur les performances du casque, l'exercice a aussi été effectué sur un ordinateur avec écran en 2D avec une interface développée spécialement pour l'exercice afin de comparer les deux systèmes et analyser l'efficacité du casque. Après avoir évalué les informations fournies par les rapports des participants, il en ressort de meilleures performances avec l'ordinateur ce qui s'explique par l'habitude de l'utilisation de cette technologie et par confort, car l'utilisateur se retrouve dans une situation complexe et difficile auquel il n'est pas entraîné. Cependant, les résultats avec le casque de réalité augmentée sont certes plus faibles, mais quand même relativement proches. De ce fait si on considère que la technologie de la RA a été une première expérience pour tous les utilisateurs en incluant que l'interaction par le système était également novateur (utilisation seulement des mains sans contrôleur), on peut considérer que cette technologie avec plus de pratique et de formation pourrait égaler voir dépasser les performances de l'ordinateur dans un milieu critique. La section discussion et résultats de l'article présente tous les détails.

En premier lieu, nous présenterons le travail scientifique réalisé au cours des dernières années sur les points suivants : la réalité augmentée et virtuelle en général puis leurs utilisations dans la téléopération de robots. Nous traiterons du fonctionnement d'un système autonome ainsi que du planificateur de mission, puis nous parlerons de l'interface utilisateur et des interactions dans un environnement en réalité augmentée entre un humain et un système.

Ensuite, nous aborderons le domaine de l'urgence en relatant l'impact du stress humain dans une situation d'urgence et les différents moyens de pouvoir évaluer celui-ci. De plus, nous parlerons de l'utilisation de la réalité virtuelle dans le domaine de la simulation. Nous présenterons ensuite le contexte, le but, les objectifs ainsi que les hypothèses de la recherche.

Nous présenterons l'article scientifique sur le sujet de ce mémoire. Nous traiterons après cela des méthodologies et discussions complémentaires pour traiter des aspects qui n'ont pas été abordés dans l'article.

Enfin, nous conclurons sur l'ensemble du projet par une synthèse ainsi que les améliorations futures.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Définition de la réalité augmentée

La réalité augmentée (RA) est présentée par Azuma [8] comme une technologie qui superpose de l'information virtuelle dans l'environnement et s'installe de plus en plus dans notre quotidien. Le développement avancé sur cellulaire disponible au grand public permet de fournir au plus grand nombre des applications en réalité augmentée ou réalité virtuelle. Aujourd'hui, la réalité augmentée et virtuelle est devenue accessible à tous par l'utilisation de visiocasque. Ce concept d'une nouvelle réalité se représente à différents niveaux.

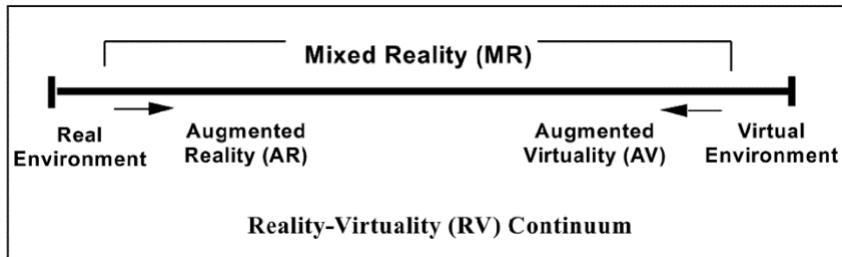


FIGURE 2.1 Continuum de la réalité virtuelle Milgram et al. [47]

Milgram et al. [47] parlent dans la figure 2.1 du principe de la réalité augmentée qui consiste à ajouter de l'information visuelle dans le monde réel. Ils considèrent l'affichage d'un hologramme dans une salle réelle comme une réalité augmentée correspondant à la partie gauche de l'échelle (figure 2.1), car ils se basent principalement dans un environnement réel. À l'inverse sur la partie droite de cette l'échelle, la réalité virtuelle coupe toute interaction du monde réel afin de plonger l'utilisateur dans l'immersion totale d'une réalité complètement différente et fictive. Le concept de «*Mixed reality*» (MR) se situant au centre de l'échelle consiste selon Milgram et al. [47] à se servir de situations réelles (configuration d'une salle, utilisation d'objets réels) pour afficher de l'information numérique. On aborde ici une réalité qui traite en tout temps d'environnements réels et virtuels.

Un état de l'art réalisé par Van Krevelen and Poelman [61] sur la réalité augmentée couvre bien le sujet. Ils présentent toutes les technologies de réalité disponibles et des cas d'applications dans le monde actuel en commençant par des applications industrielles pour de la maintenance de machine jusqu'à des applications pour le milieu scolaire ou sportif. Dans un cadre chirurgical, ils parlent d'améliorer la vision des médecins en superposant une image virtuelle du rayon X sur le corps réel du patient. Ils relatent également que les conceptions

d'interface pour la RA doivent être pensées autrement que ceux considérés «conventionnels» pour les ordinateurs (Microsoft, Apple, etc.). Van Krevelen and Poelman [61] soutiennent l'importance de l'aspect 3D qui nécessite d'être revu pour l'interface utilisateur. Ils listent les principales limitations du domaine d'un visiocasque : la portabilité, l'utilisation extérieure, la calibration, la latence et la perception de profondeur. Ces contraintes compliquaient fortement la diffusion à grande échelle, cependant de plus en plus de technologies ont résolu certaines limitations et sont déjà disponibles (Magic Leap 1, Hololens 2.0). Récemment, Park et al. [50] montrent qu'il est possible de construire le contenu holographique sur un ordinateur et de le diffuser sur un visiocasque à distance via une communication réseau pour délocaliser les calculs et ainsi optimiser les performances techniques. Ils présentent une méthodologie pour calculer les probabilités d'affichage d'un hologramme à l'écran selon la position de l'utilisateur dans l'espace. Ils expérimentent la diffusion à l'aide d'un Hololens et en concluent qu'avec un réseau stable la diffusion fonctionne correctement. Klinker et al. [38] ont cherché à implémenter l'utilisation des visiocasques RA dans divers domaines de productions industrielles. Ils ont voulu changer la perception du monde réel de l'utilisateur en lui ajoutant de l'information. Leur système a été conçu pour dix compagnies différentes pour déterminer les domaines où cette technologie permettait une meilleure optimisation du travail humain. Leurs recherches aboutissent à une liste de différents cas d'utilisation se trouvant dans la table 2.1. Les cinq cas d'applications en caractères gras dans le tableau 2.1 seront les principaux points de notre projet que nous aborderons plus tard.

TABLEAU 2.1 – Cas d'applications pour visiocasque en réalité augmentée par Klinker et al. [38]

Cas d'applications	Description
<b>Communication</b>	Aide à recevoir ou envoyer des informations sur des emplacements
Documentation	Offre la possibilité de documenter les processus à la volée
Guidage de processus	Fournit les informations de guidage
Éducation	Utilisation de visiocasque pour enseigner
<b>Alertes</b>	Attirer l'attention lors d'une information urgente ou d'un avertissement
<b>Visualisation de données</b>	Affichage d'informations augmentées in situ (sur place)
<b>Contrôle automatique</b>	Réduire le taux d'erreurs dans les processus
Gestion d'inventaire	Suivi automatique des objets et ressources pour l'optimisation de la consommation, de l'utilisation et de la commande
Allocation de ressources	Gérer des capacités limitées (temps, personnel)
TraITEMENT de texte	Générer ou interpréter des langages écrits
<b>Navigation</b>	Fournir des itinéraires et des séquences d'actions

## 2.2 Système autonome

Nous avons ensuite analysé les systèmes complexes afin de les contrôler en RA. Un système autonome (SA) correspond à un ensemble de véhicules aériens sans pilote (UAV - *unmanned aerial vehicle*) qui sont des machines agissant sous des directives humaines. Ils fonctionnent de manière synchrone en utilisant l'intelligence artificielle pour accomplir des tâches. Noor et al. [49] affirment que les drones appartiennent au groupe des UAVs. Cette machine volante sans pilote est généralement télécommandée à distance. Elle peut être conçue différemment selon des variables physiques (poids et taille) pour s'accommoder à des situations dans l'objectif de récolter de l'information. Un exemple de représentation de drone se trouve à la figure 2.2. Noor et al. [49] expliquent que ces robots peuvent être équipés de plusieurs capteurs, dont des caméras et sont utilisés dans plusieurs situations (vidéos, surveillance, etc.). La notion d'interaction de l'essaim avec l'humain est tout aussi importante et a été analysée par Kolling et al. [39] qui recensent les propriétés de l'essaim à prendre en compte comme

la gestion de la communication et de la perception cognitive. L'autonomie de ce système se traduit par le partage des tâches et une constante communication entre chaque machine pour réaliser leurs objectifs. Une personne est capable de contrôler un essaim de drones et la particularité du système consiste dans la direction de l'ensemble du système à l'aide d'un ordinateur et d'un visiocasque RA par une seule personne.

De plus, Atyabi et al. [7] parlent de l'impact de la gestion d'un système composé de UAVs et micro véhicules aériens (MAV - *micro air vehicles*) sur la conscience de la situation. Ils relatent qu'une mauvaise supervision humaine sur un système autonome peut dégrader l'efficacité et la précision des machines. Ils expliquent la nécessité qu'un système autonome ne doive pas devenir totalement indépendant de toute forme de directive, mais qu'il doit considérablement réduire la charge de travail mentale et physique de l'utilisateur pour améliorer la conscience de la situation.



FIGURE 2.2 Exemple de drone

### 2.3 Interactions liées aux visiocasques

Afin de comprendre comment contrôler un système complexe, nous avons analysé les moyens possibles avec un visiocasque de RA. De nombreuses recherches ont été élaborées afin de déterminer les différentes actions possibles pour interagir avec un système, Sasaki et al. [56] travaillent sur le design d'un premier casque RA qui utilise les doigts de la main comme outil d'interaction. C'est l'un des premiers casques de réalité augmentée. Un menu utilisateur s'affiche sur une main en superposant un bouton sur chacun de ses doigts, il peut ensuite sélectionner un bouton en posant l'index de son autre main sur un bouton. Les performances techniques du casque étaient particulièrement lentes, mais cela s'explique par le manque de puissance de calcul dans ces années-là. Quelques années plus tard, Ajanki et al. [2] conçoivent un casque RA similaire, mais ne concentrent pas leur attention seulement sur les moyens d'interaction. Ils traitent de la notion de reconnaissance faciale grâce à des caméras, et sur des informations contextuelles pour une interface en réalité augmentée. Ils introduisent une nouvelle manière de cibler des éléments à l'aide du regard, mais ne l'implémenteront pas dans leur visiocasque. De nos jours, ce mode d'interaction est particulièrement utilisé avec la technologie Hololens de Microsoft. Ajanki et al. [2] font usage d'un écran tactile en supplément

du visiocasque pour pouvoir interagir avec leur environnement. Ils ont réalisé une étude de faisabilité en utilisant leur outil comme un guide en réalité augmentée dans un laboratoire. En confrontant le visiocasque et un ordinateur portable, il s'est avéré que la nouvelle technologie était fortement appréciée. D'autres travaux plus récents font usage d'interactions avec des robots, Das et al. [23] développent un système liant un essaim de plusieurs machines aériennes ou terrestres avec le visiocasque Hololens de Microsoft pour interagir. Le capteur du visiocasque détecte les mouvements de la main en face de l'utilisateur. Le regard et les actions de la main lui permettent de placer des points de passage pour diriger les robots. Leur objectif était de concevoir une interface personne-machine adaptée en réalité mixte pour contrôler une architecture de machines. Das et al. [23] ont donc listé les différents types d'entrées que l'on peut utiliser dans le tableau 2.2.

La reconnaissance de gestes est l'une des méthodes utilisées sur le travail de Herrmann and Schmidt [32], ils se servent du Hololens utilisant des caméras et des senseurs pour détecter des actions précises des mains et des mouvements de la tête. La figure 2.3 recense ce que peut reconnaître le visiocasque Magic Leap 1. Ces actions ont servi à contrôler un véhicule de type UAV. Ils ont fait une évaluation comparative entre l'utilisation d'une télécommande traditionnelle et de leur système pour diriger un drone. Le test est réussi par toutes les personnes, mais la rapidité des missions avec leur outil n'est pas aussi efficace qu'avec la télécommande selon leurs résultats et conclusions. Dans la même approche, il est possible d'implémenter des composantes externes pour détecter le mouvement des mains de manières plus précises comme la technologie LEAP Motion utilisée dans le travail de Cousins et al. [20] pour contrôler des bras robotiques. Les résultats de leur évaluation montrent que le suivi des mains est fonctionnel et que la machine suit correctement les positions de mains pour un contrôle à distance. En 2009, Wang and Popović [64] introduisent le concept de gant

TABLEAU 2.2 – Types d'entrées pour interagir avec un visiocasque de réalité augmentée

Entrées	Détail
La reconnaissance de gestes ou mains	Utilisation de gestes ou des mains
La voix	Reconnaissance vocale de mots ou phrases
Le suivi des yeux	Détection du regard utilisateur
Contrôleur	Utilisation d'appareils avec boutons et capteurs
Contrôle à distance	Utilisation de commandes à distance via le réseau

connecté pour capter les positions de la main en temps réel afin de la représenter dans un environnement virtuel. Ils créent un gant coloré de plusieurs couleurs et se servent d'une caméra pour détecter la position des couleurs et ainsi reformer la main ailleurs. L'évaluation montre que le suivi est correct, mais un décalage d'une dizaine de millimètres de la main virtuelle comparée à la main réelle est détecté. Tandis que plus récemment, Hsiao et al. [35] conceptualisent un gant connecté sans fil et présentent leur matériel électronique utilisé pour virtualiser la main. Le gant reconnaît des gestes grâce à l'apprentissage machine par classification et grâce à un senseur inertiel présent dans le gant. Aujourd'hui, le dévoilement du casque Hololens 2 de Microsoft [46] montre la capacité du visiocasque à suivre les mains en temps réel permettant d'interagir directement avec les hologrammes.

Un système peut générer plusieurs types de retours pour informer l'utilisateur, listé dans le tableau 2.3. L'ensemble de ces interactions permet à l'utilisateur de naviguer dans un système en réalité augmentée pour consommer de l'information pertinente. Elles peuvent également lui offrir la possibilité d'envoyer des commandes. Les retours quant à eux préviennent et informent l'utilisateur. Dans le livre de Trzcielinski et al. [58], l'auteur Mura à la page 232-240 montre l'impact de l'utilisation d'un visiocasque sur une tâche industrielle. Comparée à un guide d'utilisation basique basé sur du papier, la réalité augmentée prouve ici que l'humain comprend plus rapidement les informations grâce à un visiocasque RA.

## 2.4 Conception de l'interface utilisateur

Pour bien comprendre les informations données par le système complexe et d'interagir correctement avec lui, il est important de bien comprendre la conception d'une interface utilisateur. L'interface est définie par Hookway [34] comme une passerelle entre l'expérience humaine et les actions qu'il ne peut pas entreprendre seul. C'est dans le cas de la réalité augmentée la possibilité de visualiser des informations d'une part et de l'autre de donner des commandes au système par différents moyens d'interactions humaines. Ainsi, le travail sur la conception

TABLEAU 2.3 – Types de retour avec un casque de réalité augmentée

Sorties	Détail
Hologramme	Affichage d'informations virtuelles
Audio	Retour de son par des hautparleurs
Haptique	Retour de force ou sensoriel comme la vibration d'un contrôleur

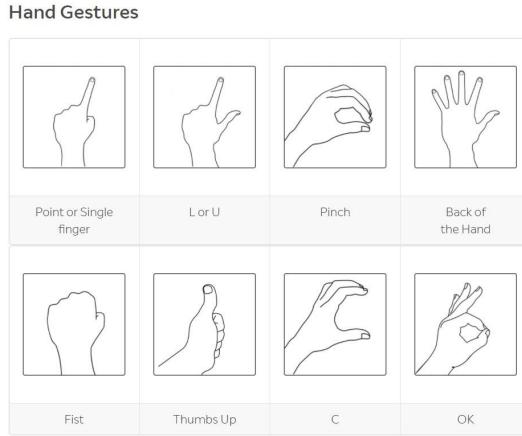


FIGURE 2.3 Gestes reconnaissables par le visiocasque Magic Leap One Leap [43]

de l'interface utilisateur pour faciliter la compréhension du système par la personne est nécessaire. Beaucoup de technologies comme Microsoft [45] et Apple [4] ont leur propre design pour que celles-ci soient faciles d'utilisation, intuitive et confortable. Leurs méthodes sont majoritairement adaptées pour des surfaces 2D. L'enjeu en réalité augmentée se base sur d'autres principes, car elle offre un espace en 3D avec 6 degrés de liberté. D'abord, Argenta et al. [5] traitent la RA comme support pour des missions tactiques (militaires) et prennent en considération les gestes, la voix et le toucher. Ils font attention à ce que l'interface ne gêne pas l'utilisateur de sa vision de la réalité. Leur travail ici est de superposer l'information aux militaires sans obstruer la vue principale du terrain réel. L'interface utilisateur graphique a été développée pour être intuitive pouvant retourner des données sur les positions alliées et ennemis dans le but d'améliorer la réussite et la rapidité des missions. Ensuite dans le tableau 2.4 figurent les différents regroupements d'outils utilisés en RA. Enfin, Bertrand et al. [9] ont plutôt revu les principes d'interface sur un système qui concerne le quotidien : les applications de gestion de courriels. Ils énoncent les actions suivantes : l'affichage de plusieurs courriels, l'ouverture et la lisibilité d'un courriel par réalité augmentée. Ils ont dû faire de nombreux ajustements pour que l'interface soit agréable et intuitive à la personne dans ce nouveau milieu. Il n'est pas approprié de se baser sur le design général d'une application courriel d'un ordinateur pour s'en servir en réalité augmentée. Ils ont pris en compte par exemple la difficulté de lire un texte volumineux en réalité augmentée et ont décidé d'utiliser la méthode *Rapid Serial Visual Presentation* (RSVP) [33] qui consiste à afficher mot par mot de façon rapide le contenu du message. C'est une idée pour concevoir les concepts d'interface pour la RA.

TABLEAU 2.4 – Regroupements d’outils en réalité augmentée pour assister un humain en mission tactique (Argenta et al. [5])

Nom	Détail
Outils statiques	Correspond aux outils affichés constamment vis-à-vis de la vision utilisateur. Informations générales sur la mission. État du réseau, pourcentage de batterie restante, etc.
Outils dynamiques	Affichage lié à des ressources extérieures à la personne. Cible pour positionner les alliés ou ennemis à proximité. Visible si l’utilisateur regarde dans la direction de la cible.
Outils situationnels	Outil permettant de faciliter la localisation et l’orientation de la personne en réalité. Utilisation d’une boussole.

## 2.5 Expérience de l’utilisateur

La notion d’utilisation d’une interface utilisateur implique de savoir évaluer et comprendre l’expérience utilisateur de celle-ci. En 2009, Law et al. [42] expriment qu’il est difficile de correctement définir l’expérience utilisateur (UX - *user experience*). Leurs travaux rassemblent les avis de 275 chercheurs venant d’université ou d’industrie dans le but de comprendre le sens du sujet. Selon eux, la difficulté de définir l’expérience utilisateur provient de l’association à trop d’informations diverses liant des concepts dynamiques comme les émotions et l’expérience. Ils ont rassemblé les multiples définitions de l’expérience utilisateur et ont demandé l’avis de l’ensemble des chercheurs. La définition la plus soutenue par la recherche est la suivante :

«Une conséquence de l’état interne de l’utilisateur (prédispositions, les attentes, les besoins, la motivation, l’humeur, etc. le système conçu (p. ex. complexité, but, convivialité,),) et le contexte (ou l’environnement) au sein de l’interaction (p. ex. le contexte organisationnel/social), le sens de l’activité, le caractère volontaire de l’utilisation, etc.).»

Par Hassenzahl and Tractinsky [31].

Par la suite, Hammady et al. [30] rassemblent également plusieurs définitions de l’expérience utilisateur, mais ils se basent sur la même définition que Hassenzahl and Tractinsky [31] afin

de développer une application de réalité augmentée dans un musée. Afin d'évaluer correctement leurs approches, leurs travaux se concentrent sur la construction d'un modèle de design d'expérience utilisateur afin d'accroître le niveau d'interaction de la personne. Ils découpent leur modèle en trois phases distinctes : les besoins, le design de l'expérience utilisateur et l'évaluation. La première phase de besoin consiste à rassembler l'ensemble des données avant de commencer le design du système et lister l'ensemble des objectifs. La seconde phase comprend le design de l'expérience utilisateur. Cette phase consiste dans le développement en tenant rigueur du contexte direct de l'utilisation (ici un musée). Dans leur contexte, les développeurs ont visité le musée et discuté avec le personnel. Le développement consiste ensuite à définir les éléments du système et construire les éléments d'interactions utilisateurs. La dernière phase d'évaluation inclut les utilisateurs directs pour le système. Elle suit une méthodologie adaptée au contexte pour recevoir un retour d'informations permettant d'évaluer le système. Au contraire, Arifin et al. [6] expliquent qu'il n'existe pas de standard pour évaluer l'expérience utilisateur. Ils pensent que des métriques standardisées peuvent aider à mesurer l'expérience utilisateur d'une application. Pour cela leur revue traite de l'expérience utilisateur pour les types d'applications suivants : Web, mobile, réalité augmentée et de type «autre». Finalement, dans ce qui concerne la réalité augmentée. Les méthodes d'évaluations utilisées sont i) la méthode qui mesure la qualité en se servant de métrique de satisfaction de l'utilisateur (SUXES) [59], ii) la méthode qui se sert de critères de qualité pragmatique permettant de mesurer le niveau d'utilisabilité d'une application (AttrakDiff) [60] ainsi que iii) celle qui traite des critères de relations émotionnelles entre l'utilisateur et ses interactions avec l'application (Emocards) [3]. Toutes ces recherches démontrent qu'il est nécessaire d'expérimenter l'interface avec des personnes pour valider sa conception afin de concevoir une interface intuitive pour l'utilisateur.

## 2.6 Téléopérations sur des systèmes robotiques

Ayant défini les systèmes complexes et les interfaces en RA, nous avons ensuite analysé les différents travaux liant RA et téléopération de systèmes robotiques. Kruckel et al. [40] définissent la téléopération comme le moyen de guider une machine à distance par assistance humaine dans le but d'accomplir des tâches. Cette assistance permet d'éviter la présence de personnes dans des milieux à risque. Dans leur travail, ils se servent d'un casque de réalité virtuelle Oculus Rift pour diriger un robot de cartographie terrestre équipé de caméras pour accomplir des opérations de reconnaissance. Ils conçoivent une nouvelle méthode de téléopération qui ici plonge l'utilisateur dans un environnement totalement immersif lors du contrôle. Par ailleurs, les expérimentations de Brizzi et al. [10] consistaient à commander le

bras d'un robot pour prendre et déposer des objets sur une table. Ils ont voulu tester cette téléopération avec un casque de réalité virtuelle (RV) afin d'immerger la personne pour opérer le bras robotique. Dans cet affichage virtuel, les utilisateurs pouvaient avoir ou non un retour visuel pour les aider dans leurs objectifs. Les résultats montrent que la présence de l'assistance visuelle améliore la rapidité d'exécution des tâches. D'un autre côté, Chintamani et al. [15] arrivent à la même conclusion dans leurs tests, cependant ils en déduisent également que le taux d'erreur dans l'accomplissement de la tâche n'est pas modifié par l'ajout de l'assistance visuelle. Leurs expérimentations consistaient à déplacer un bras robotique par téléopération et guider l'opérateur à l'aide de la RA. Ils ont décidé de réaliser un affichage RA de deux manières différentes : un itinéraire complet pour guider le bras du début à la fin et un itinéraire partiel. Ils concluent que l'humain est plus efficace dans ses tâches lorsque l'information affichée est pertinente sans être encombrante. On peut en déduire qu'une interface trop chargée gêne l'utilisateur et l'empêche d'optimiser son travail.

Récemment en 2017, Park et al. [51] essayent de faciliter la précision des opérations grâce à la réalité augmentée. Ils utilisent la Kinect de Microsoft pour contrôler un robot et visualisent la scène réelle avec des informations virtuelles affichées sur un écran. Dans la même idée Frank et al. [28] se servent d'une tablette tactile pour obtenir une image augmentée de la zone de travail du robot afin de diriger le bras. Brizzi et al. [10] affichent également une vision réelle en ajoutant des informations virtuelles dans un casque de réalité virtuelle à l'utilisateur pour contrôler un bras robotique. Le robot se trouvant à la figure 2.4 correspond à celui utilisé par Brizzi et al. [10]. Ils lient les avantages de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle en un seul système.

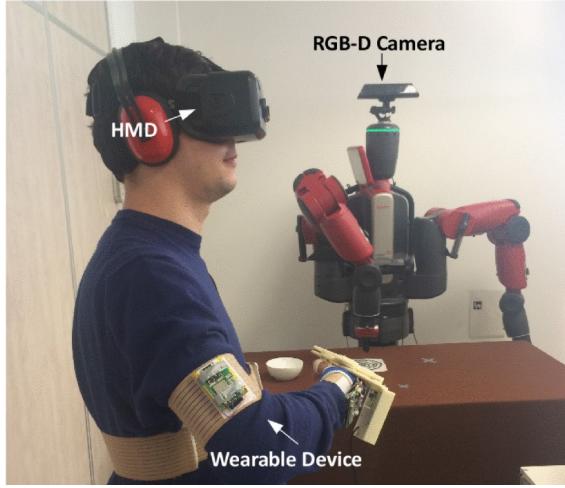


FIGURE 2.4 Provenant de Brizzi et al. [10] montrant son expérimentation pour contrôler un robot à l'aide d'un affichage immersif.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés au principe de la commande à distance permettant de pousser les possibilités de surveillance. Ils traitent de missions de reconnaissance à l'aide de différents systèmes pour de la recherche urbaine, mission de sauvetage et analyse de structure de bâtisses. En 2007, Zalud [66] a exploré l'utilisation de la RA sur l'interface d'un robot de reconnaissance (image thermique) via la technologie de système d'opération graphique robotique avancée (ARGOS). En parallèle, Driewer et al. [24] utilisent la réalité mixte avec d'autres types de robots nommés *Mobile Experimental Rover for Locomotion and Intelligent Navigation* (MERLIN) pour cartographier une zone dans le but d'assister des missions de sauvetage. Enfin, des solutions plus récentes envoient de la même manière des robots de reconnaissance et utilisent les images capturées avec des techniques d'apprentissage machine en profondeur afin de détecter des objets clés ou une présence humaine (Wang et al. [63]). Dans le cadre d'incendies et de missions de secours avec des pompiers, Carrillo-Zapata et al. [13] montrent dans leur étude que la téléopération d'un essaim est pertinente et utile dans ces situations si la consommation d'informations est pertinente. Cependant, ils soulignent l'importance de laisser la prise de décision à l'humain et de ne pas l'automatiser. Dans la notion d'interactions à l'aide de la réalité augmentée, Patel et al. [53] utilisent une application sur une tablette tactile en RA et compare l'approche du contrôle i) selon les robots et ii) selon l'environnement. Les robots effectuaient une tâche de transport collectif, mais l'interface était spécifique pour commander des robots et non de recevoir des informations de l'essaim. À la suite de cette analyse, Patel and Pincioli [52] se sont demandés comment la direction de plusieurs robots pouvait se faire avec plusieurs personnes en même temps. Dans l'utilisation

d'une application tactile de RA, ils en déduisent que cela est efficace lorsque l'ensemble des commandes est adéquatement partagé avec toutes les personnes aux commandes pour éviter le syndrome appelé "*out of the loop*" et améliorer les performances des missions. Une autre façon d'utiliser la RA à l'aide d'un visiocasque a été faite récemment avec le Magic Leap 1 par Sullivan et al. [57] pour contrôler des robots. Ces robots ne sont pas des drones, mais ceux-ci analysent les différents moyens d'interactions possibles avec un visiocasque pour donner des commandes aux robots. Cependant ils n'explorent pas les façons de consommer l'information émise par l'essaim.

## 2.7 Planification de mission

Lorsque l'on traite de la gestion de drones, notamment dans une gestion multi-drones en temps réel, il est nécessaire de prendre en compte le planificateur de mission. Un planificateur de mission introduit par Brumitt and Stentz [11] est une station de contrôle pour gérer de façon optimale plusieurs appareils aériens ou terrestres (comme des technologies de type UAVs et MAVs) en temps réel. Il permet d'accomplir plusieurs objectifs dans des environnements dynamiques. C'est un élément essentiel dans le déroulement d'une opération. L'outil a d'abord été développé dans le milieu militaire et devient de plus en plus disponible sur le marché public. Des chercheurs ont travaillé sur un planificateur pour réaliser de manière autonome des tâches complexes. Cai and Yan [12] définissent ce système comme le moyen de trouver le meilleur itinéraire de vol avec une stratégie de contrôle valide. Ils présentent leur méthodologie pour concevoir la trajectoire de leurs appareils et dans leur conclusion, ils affirment que la RA est une bonne manière pour entraîner des pilotes. Ils justifient que cela apporte une meilleure conscience de la situation. Chandarana et al. [14] expliquent qu'une station de contrôle doit être adaptative aux personnes avec ou sans expérience. Ce planificateur peut servir selon eux dans les types de missions spécifiques suivants :

- Type de missions
- Missions scientifiques atmosphériques
- Secours aux sinistrés
- Recherche et sauvetage
- Surveillance et reconnaissance

Les types de missions pertinentes vis-à-vis de nos recherches sont autour de «recherche et sauvetage» et «surveillance et reconnaissance». Leurs interactions avec le planificateur sont basées sur l'utilisation de gestes et de commande vocale, car ce sont selon Chandarana et al. [14] des moyens naturels humains pour agir.

## 2.8 Le domaine des situations d'urgence

Différents cas de situations d'urgence peuvent être représentés par une opération chirurgicale, l'arrivée d'une catastrophe naturelle ou bien lors d'une alerte attentat. Beaucoup d'actions sont effectuées sous un stress conséquent pour des sauvetages ou des missions militaires. Lee and Kwon [44] expliquent que 71% des accidents d'aviation sont dus à des erreurs humaines. Ces erreurs proviennent d'une forte charge de travail et d'un haut niveau de stress. Ils expérimentent des simulations d'attaques d'hélicoptères avec des pilotes sous deux scénarios possibles. La première assiste le pilote à l'aide de commande vocale depuis un centre de commandement, la seconde lui ajoute un outil de localisation de l'hélicoptère permettant de voir son orientation, son trajet et les véhicules autour de lui. Les résultats montrent que les pilotes du second scénario ont moins de pression mentale et donc moins de stress. On en déduit ici que diminuer la charge de travail de l'opérateur à un impact positif sur le stress. Au contraire si une personne n'a pas assez d'informations sur la situation, la charge de travail mentale et physique devient trop importante et génère de la frustration ce qui engendre des erreurs. D'un autre côté, Villani et al. [62] travaillent sur le stress qui peut être ressenti par l'utilisation de casque immersif plongeant la personne dans un milieu auquel elle n'a pas l'habitude. Ils recensent que les personnes qui ne sont pas à l'aise avec les technologies récentes sont plus répulsives aux visiocasques. Elles peuvent ressentir des nausées et générer du stress.

Un autre problème survient lors de la méthode d'évaluation du stress humain et de la charge de travail. On recense dans la littérature deux principaux moyens pour déterminer le stress humain. La première consiste à reconnaître les émotions par électroencéphalogramme (EEG) [54], c'est un dispositif électronique placé sur un humain permettant de détecter les émotions selon l'activité cérébrale. Cette idée est utilisée en médecine par Duru et al. [25] pour évaluer le comportement d'une personne effectuant une opération chirurgicale. Il existe également une alternative sans la présence de senseurs sur le cerveau développé par la NASA [48]. L'outil NASA-TLX est constitué d'un ensemble de questions qui demande d'échelonner son effort de 0 à 100 dans plusieurs types d'actions mentales et physiques. Lee and Kwon [44] que nous avons vu au début de la section 2.8 mettent en place une simulation d'une attaque d'hélicoptère afin d'évaluer le ressenti des pilotes. Leurs résultats utilisent cette méthode pour évaluer les charges physique et mentale ainsi que la frustration des personnes. Les questions de ce formulaire figurent dans le tableau 2.5.

TABLEAU 2.5 – Catégories et description du formulaire NASA-TLX

Catégories	Description
Demande mentale	À quel point l'effort mental et perceptuel était nécessaire ? La tâche était-elle facile ou exigeante, simple ou complexe ?
Demande physique	À quel point l'effort physique était nécessaire ? La tâche était-elle facile ou exigeante, simple ou complexe ?
Demande temporelle	Pendant combien de temps avez-vous subi une pression en raison du rythme auquel les tâches ou les éléments se sont déroulés ? Le rythme était-il lent ou rapide ?
Performance	Dans quelle mesure avez-vous réussi à accomplir cette tâche ? Dans quelle mesure êtes-vous satisfait de votre performance ?
Effort	Avez-vous eu du mal à travailler (mentalement et physiquement) pour atteindre votre niveau de performance ?
Frustration	Dans quelle mesure avez-vous ressenti de l'irritation, du stress et de l'agacement par rapport au contenu, à la détente et à la complaisance ?

Dans leur livre, Endsley et al. [27] introduisent la conscience de la situation et la définissent comme la compréhension de i) ce qui se passe autour de nous, ii) de la situation actuelle et iii) de celle qui arrivera. Ils expliquent que cela consiste également à sélectionner les informations importantes pour effectuer des tâches particulières. Ils considèrent cet aspect comme l'engrenage pour prendre des décisions pertinentes et ainsi atteindre une performance optimale pour des systèmes complexes et dynamiques. Selon eux, le stress ainsi qu'une forte charge de travail physique et mentale sont des facteurs qui restreignent la conscience de la situation. Cela distrait la personne et l'empêche de prendre les bonnes décisions. Ils justifient l'erreur humaine par une mauvaise conscience de la situation due à ces contraintes. Endsley [26] a mis en place une méthodologie pour évaluer cette appréhension. La technique d'évaluation globale de la prise de conscience de la situation (SAGAT - *Situation Awareness Global Assessment Technique*) permet de mesurer la conscience de la situation des pilotes dans des opérations aériennes. Des questions sont posées au pilote pendant la mission pour obtenir son ressenti. Ils expriment que l'humain a tendance à généraliser si l'on demande son ressenti lors de la fin du test ce qui ne permet pas d'évaluer correctement. Ces questions portent sur

trois niveaux. Le premier sur la perception de la situation, le second sur la compréhension et le dernier sur la prédition des évènements futurs. Ces questions sont ensuite échelonnées afin d'obtenir une note sur la compréhension de la situation. Un article récent Clifford et al. [17] utilise la SAGAT pour évaluer l'entraînement des pompiers aéroportés dans différents environnements de simulation. Il compare trois méthodes d'affichage : i) écran simple, ii) visiocasque en réalité virtuelle et iii) système de projection sur un écran cylindrique. Dans cette recherche, ils concluent avec la SAGAT que la conscience de la situation est meilleure avec les deux dernières méthodes ii) et iii) comparées à i) l'utilisation d'un écran simple.

## 2.9 Simulation d'une mission

La mise en place de scénarios complexes en situation réelle peut se révéler coûteuse et la simulation est une bonne alternative pour l'élaboration de missions d'entraînement notamment les situations d'urgence. Ruiz et al. [55] s'aident des technologies immersives pour concevoir leurs exercices afin d'entraîner des pilotes aériens ou des acteurs de l'urgence. Ils construisent une opération de gestion de plusieurs véhicules de type UAV. Dans un contexte de compréhension de la situation, il évalue l'apprentissage de l'utilisateur selon la SAGAT et la méthode NASA-TLX avec trois affichages immersifs : i) écran simple, ii) écran géant incurvé (100 degrés de champ de vision) et iii) un visiocasque (Oculus Rift) de réalité virtuelle. Chacune de ces technologies possède des propriétés bien différentes permettant d'évaluer celle qui est la plus optimale pour un scénario d'urgence. Il en résulte que les plus efficaces sont ii) l'écran incurvé et iii) le visiocasque où l'on voit une nette différence vis-à-vis des résultats avec l'utilisation d'un écran simple. Clifford et al. [17] effectuent la même expérience dans le but d'entraîner des sapeurs-pompiers. Ils expliquent que leur pratique est difficile en terrain réel à cause de deux limitations importantes : le coût et l'impact environnemental. La simulation en réalité virtuelle leur offre la possibilité de générer des comportements cruciaux qui sont complexes à obtenir sans entraînement sur le terrain. Ils cherchent à savoir quel type d'affichage immersif est le plus approprié pour leurs pratiques. Ils comparent l'utilisation des technologies que Ruiz et al. [55] utilisent ci-dessus en évaluant la connaissance de la situation des utilisateurs avec la SAGAT. Ils en résultent les mêmes conclusions, c'est-à-dire que le visiocasque et l'écran géant incurvé apportent une meilleure connaissance de la situation à l'utilisateur comparés à un simple écran.

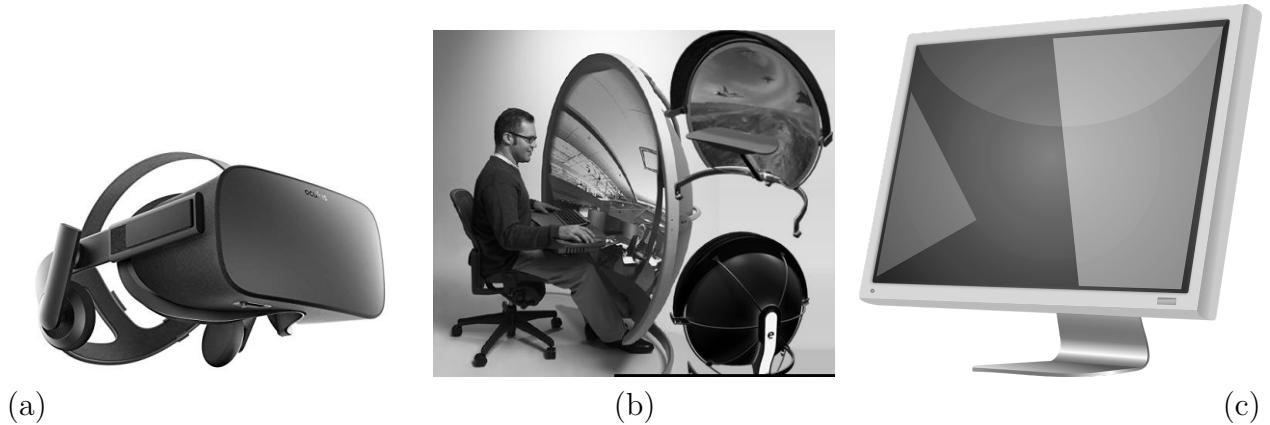


FIGURE 2.5 Visiocasque fermé Oculus Rift (a), Écran géant incurvé de Elumens (b) et écran simple (c)

## 2.10 Réalité augmentée en milieu extérieur

Nous avons abordé précédemment l'utilisation des visiocasques RA mais leurs utilisations en extérieur sont encore rares et recensent quelques propriétés qui nécessitent d'être soulevées. Les visiocasques RA affichent des hologrammes composés de lumière. Ces hologrammes ne sont pas totalement opaques et sont plus ou moins visibles selon la luminosité ambiante où se trouve l'utilisateur. En extérieur, cette luminosité est problématique, car elle peut être forte en journée et empêcher l'utilisateur de correctement voir l'affichage du casque. Dans son mémoire Kermarec [37] expérimente le Hololens 1.0 en milieu extérieur. Il constate que les hologrammes sont visibles s'ils sont placés en milieu ombragé, mais que même les hologrammes les plus lumineux sont difficilement discernables en pleine lumière du jour. Les enregistrements vidéo provenant du casque sont peu représentatifs de ce que l'on peut réellement voir avec l'œil humain : la vidéo n'apporte qu'une vue en 2D et les hologrammes sont plus visibles sur la vidéo comparé à la réalité. Il conclut que la luminosité ambiante de l'environnement est un impact très important à prendre en compte pour une utilisation extérieure. Des personnes ont réfléchi à des alternatives pour tenter de résoudre cette question. Dans la figure 2.6, Nathan Gaydhania récupéré un film plastique utilisé dans le domaine de la photographie pour absorber 60% de la lumière passante. Il applique ce filtre sur le visiocasque pour améliorer la visibilité des hologrammes.



FIGURE 2.6 Hololens 1.0 avec filtre de réduction lumineuse par Gaydhani [29]

## 2.11 Contexte de la recherche

Le but du projet est d'assister l'humain dans la gestion des situations d'urgence. Pour l'aider dans sa tâche, un système autonome formé de UAVs est initialement contrôlé par l'utilisation d'un planificateur de mission. Ces drones sont composés de caméras et chacun réalise un objectif commun ou spécifique. Le système communique sous un réseau ad hoc indépendant sans l'utilisation du réseau internet ou 4G/5G cellulaire permettant son déploiement dans tout milieu. Nous voulons mettre en place un système hybride composé d'un visiocasque et d'une tablette tactile pour assister la supervision humaine dans ce type de mission. Notre étude recense les cas d'application en gras qui figurent dans le tableau 2.1. Nous voulons montrer que la technologie de la réalité augmentée possède un potentiel important dans le domaine de l'urgence. Il existe aujourd'hui des systèmes permettant de contrôler un véhicule aérien avec un visiocasque comme celui développé par Herrmann and Schmidt [32], mais il n'existe pas encore une application en réalité augmentée permettant de gérer un système composé de plusieurs UAVs dans le domaine de l'urgence spécifiquement avec pour la situation des pompiers. L'essaim de drones est envoyé pour faire une inspection détaillée des lieux. Il faut donc tout d'abord déterminer comment ce système autonome fonctionne et quelles sont les interactions possibles pour le contrôler en cas de nécessité. Lang et al. [41] ont réalisé une analyse de l'ensemble de la littérature recensant 388 articles traitant des applications sur le casque Hololens pour la production et la logistique. Dans leur étude, ils relèvent qu'environ 29% des publications expérimentent le Hololens dans le domaine de la robotique. Sur les utilisations, 50% ont pour but d'être un système d'assistance. Cela démontre l'opportunité de poursuivre notre étude.

Plusieurs outils ont été développés pour répondre à des besoins d'informations lors d'une mission d'urgence. Chaque outil a été conçu en deux ou trois dimensions (2D/3D) selon le



FIGURE 2.7 Hololens 2.0 Microsoft [46]

type. Le système est composé d'un visiocasque RA et d'un ordinateur tactile. Il faut une homogénéité des actions et visualisations sur les deux machines. Ce système hybride a pour fonction d'améliorer la connaissance de la situation de l'utilisateur pour le bien de la mission. Dans l'objectif de tester nos recherches dans une situation d'urgence immersive, nous avons réfléchi à plusieurs configurations pour mettre en place un environnement de test comme un écran géant incurvé (figure 2.5) ou l'utilisation de l'environnement virtuel automatique de grotte (CAVE - *cave automatic virtual environment*) de Cruz-Neira et al. [21] dans la figure 2.8.

## 2.12 Objectifs

Dans un environnement de simulation de sauvetage, notre objectif vise l'utilisation d'un visiocasque RA par un opérateur de l'urgence pour visualiser l'information sur la mission afin de mieux comprendre la situation et qu'il ait accès à différents outils de navigation et de visualisation (réalisé par le partenaire industriel et nous) pour assimiler le contexte et les objectifs, et ainsi opérer sur le système autonome dans le but d'accomplir la mission. En raison notamment des conditions de la pandémie de COVID-19, nous avons revu notre public ainsi que notre simulation pour adapter l'expérience à des personnes sans connaissances du milieu de l'urgence et évaluer l'efficacité de la RA en situation d'urgence.

### 2.12.1 Technologie mise en place

Le projet consiste à développer un planificateur de mission assisté par réalité augmentée. Le système est composé d'un planificateur de mission (tablette tactile) et d'un visiocasque de réalité augmentée (Magic Leap 1). Les deux appareils fonctionnent de manière synchrone et communiquent via le réseau ad hoc nommé HEAVEN développé par notre partenaire industriel Humanitas Solutions. Ce système émet des actions et reçoit de l'information de la part d'un essaim de drones autonome. D'une part l'ordinateur permet depuis un écran tactile d'agir comme un planificateur de mission, c'est-à-dire de planifier des missions de cartographie et d'analyse de bâtiments et d'envoyer les objectifs de ces missions au drone qui vont se répartir les tâches de façon indépendante. Le planificateur recevra également de l'information depuis les drones pour informer l'utilisateur de l'état de chaque robot. D'autre part, la visiocasque permet à l'utilisateur de visionner l'information par hologramme dans son environnement réel en trois dimensions. Cela permet de voir les informations d'une façon novatrice et intuitive dans le but de faciliter et accélérer la compréhension de la situation. Les actions qui sont possibles de réaliser sont réparties de façon optimale entre des interactions depuis le visiocasque ou l'ordinateur (utilisation des mains). Ces interactions ont pour but

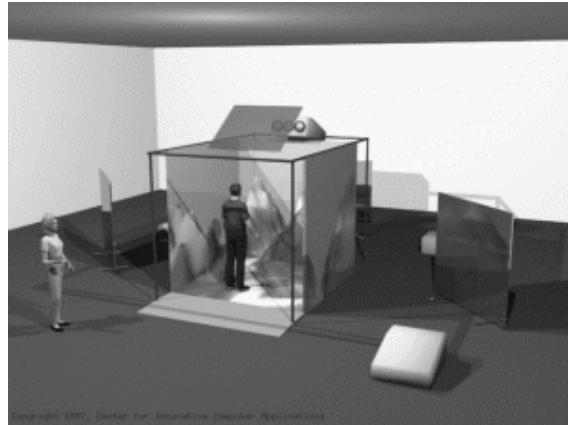


FIGURE 2.8 CAVE Copyright 1997 *Innovative Computer Applications*

de consommer de l'information ou de générer des commandes ou directives pour le système de drones autonome. Pour cela des outils de type statique dynamique et situationnel hybride entre ordinateur et visiocasques sont développés pour améliorer la conscience de la situation de l'utilisateur dans une situation d'urgence.

### 2.12.2 But

Le but consiste à déterminer l'efficacité de la réalité augmentée avec l'utilisation d'un visiocasque sur le déroulement d'une mission d'urgence à l'aide d'un système autonome provenant du partenaire industriel.

### 2.12.3 Objectifs spécifiques

Voici la liste des objectifs permettant d'atteindre le but exprimé :

O.1 - Étudier la composition du système autonome du partenaire industriel, son fonctionnement et les moyens de communication associés.

O.2 - Concevoir une interface utilisateur et complémenter les fonctionnalités du planificateur de mission.

O.3 - Réaliser des outils pour faciliter la conscience de la situation de l'opérateur pour l'opération de mission d'urgence.

O.4 - Créer un scénario de simulation en situation d'urgence et comprendre les besoins des opérateurs de l'urgence.

O.5 - Concevoir une application de réalité augmentée communiquant avec le planificateur de

mission sur tablette tactile utilisant les outils réalisés.

O.6 - Effectuer des essais avec un groupe de personnes dans une simulation d'urgence sur un scénario élaboré avec l'application mise en place.

O.7 - Analyser les résultats sur les expériences effectuées et mesurer l'efficacité de la réalité augmentée dans le domaine de l'urgence.

## 2.13 Hypothèses

Les hypothèses suivantes découlent directement de l'effet de l'application dans un scénario d'urgence. Ayant eu des personnes sans connaissances du milieu de l'urgence, nous nous sommes basés sur un formulaire personnalisé ainsi que sur les résultats de chaque participant aux exercices pour déterminer l'utilité de la réalité augmentée au sein de la situation d'urgence.

$H_{a1}$  - La réalité augmentée permet de mieux comprendre l'information dans le domaine de l'urgence.

$H_{a2}$  - La réalité augmentée améliore la conscience de la situation.

$H_{a3}$  - La réalité augmentée facilite la prise de décision.

$H_{a4}$  - La réalité augmentée facilite la résolution des objectifs de la mission.

Voici les hypothèses nulles qui en découlent :

$H_{o1}$  - La réalité augmentée ne permet pas de mieux comprendre l'information dans le domaine de l'urgence.

$H_{o2}$  - La réalité augmentée n'améliore pas la conscience de la situation.

$H_{o3}$  - La réalité augmentée ne facilite pas la prise de décision.

$H_{o4}$  - La réalité augmentée ne facilite pas la résolution des objectifs de la mission.

Pour valider ces hypothèses, nous effectuerons une expérience détaillée dans l'article au chapitre 3.

## CHAPITRE 3 ARTICLE 1 : DESIGN AND TEST OF AN ADAPTIVE AUGMENTED REALITY INTERFACE TO MANAGE SYSTEMS TO ASSIST CRITICAL MISSIONS.

**Authors:** Dany Naser Addin and Benoît Ozell

Submitted in *Computer & Graphics*, November 2020

### 3.1 Abstract

We present a user interface (UI) based on augmented reality (AR) with head-mounted display (HMD) for improving situational awareness during critical operation and improve human efficiency on operations. The UI displays contextual information as well as accepts orders given from the headset to control unmanned aerial vehicles (UAVs) for assisting the rescue team. We established experiments where people had been put in a stressful situation and are asked to resolve a complex mission using a headset and a computer. Comparing both technologies, our results show that augmented reality has the potential to be an important tool to help those involved in the emergency situation.

### 3.2 Introduction

During critical situations, many humans risk their lives to save others. Relying more on technology can alleviate such risk and enhance the emergency response success rate. Previous works implemented unmanned aerial vehicles (UAVs) based systems to prevent human from accessing dangerous areas themselves.

Information and communication technology recent developments have made data more accessible than ever, challenging human capacity to quickly process massive loads of information. In case of emergency response for instance, being able to process information in time leads to risk reduction and success rate increase. We propose to use Augmented Reality (AR) to improve such system and provide better environment visualization and assets control.

AR is a technology that superimposes virtual information on the environment and is becoming more and more common in our daily lives. The advanced development of mobile phones available to the public makes it possible to provide numerous applications in AR or virtual reality (VR). Today, augmented and virtual reality has become accessible to everyone through the use of HMD, which allows the use of AR from a different approach. These visual

representations are displayed on top of the real environment to provide additional information with the aim to assist people in complex tasks or for simple entertainment purposes.

This article is divided into three sections. First, we present emergency situations and the concept of situational awareness. We also review teleoperation with mixed reality and UAV-based rescue system. Second, we explain details on our AR-based UI design and present our implementation. Third, we present the tests conducted and discuss the results regarding the impact on humans' stress in the emergency response.

### 3.3 Related work

#### 3.3.1 Emergency Response's Strategies

The arrival of a natural disaster or an attack alert can represent different cases of an emergency operation. Many actions are carried out under considerable stress for rescue or military missions. It has been shown that 71% of aviation accidents are due to human error [44]. These errors are the result of high workloads and high levels of stress. Researchers report that reducing the operator's workload and information to be processed has a positive impact on stress. On the contrary, if a person doesn't have enough information about the situation, both mental and physical workloads become too great and this generates frustration which leads to errors. The term "Situational awareness" was introduced in 2003 by Endsley et al. [27] as the understanding of what is happening around us, the current situation and the one to come. The concept also regroups the filtering of important information to perform tasks at hand. Stress as well as a highly physical and mental workloads are factors that restrict situational awareness. This distracts the individual and prevents him or her from making the right decisions. In emergency situations, actors need to be careful about their situational awareness.

To measure the situational awareness of a person, Endsley et al. created the Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) [26] which measures the situational awareness of pilots in flight operations. Questions are asked to the pilot during the mission to measure the stress, they explained that humans tend to generalize if their feeling is asked at the end of the test which prevents a correct assessment. They use immersive technologies to design exercises for emergency responders and test usability with three immersive displays: a simple screen, a giant curved screen and a VR HMD. Each of these technologies has very different properties and each of them can be useful depending on the scenario. For training firefighters, Clifford et al. found out two important limitation factors: cost and environmental impact [17]. Another method created was the NASA-TLX form [48] consists of a set of

questions that requires one to scale one's effort from 0 to 100 in several types of mental and physical actions. Lee et al. set up a simulation of a helicopter attack to evaluate how the pilots feel [44]. They obtained results using this NASA-TLX to evaluate the physical and mental loads and frustration related to factors to evaluate situational awareness.

An autonomous system (AS) is an Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) which are robotic machines acting under human control. UAVs operate synchronously to complete tasks. Drones are from the UAV group and Yuan et al. listed numerous use cases [65]. Research found various possibilities with UAV and several sensors, including cameras depending on the situation (video, surveillance, etc.) [49]. An autonomous system poorly handled by human supervision can degrade the efficiency of using the machines [7]. Atyabi et al. present the necessity that a stand-alone system is not to become totally independent of any form of directive, but for that it must significantly reduce the mental and physical workloads of the user to improve situational awareness. In order to manage UAVs, people use a control station to optimally manage several air or ground vehicles as well called as a mission planner [11]. It allows several objectives to be accomplished in dynamic environments. It is an essential element in the progress of an emergency operation. Reducing the human presence in dangerous areas impacts on the human risk, which can be done by using autonomous systems. Carrillo-Zapata et al. found that using a robotics swarm is really efficient in fire and rescue fields [13]. In a mutual work with firefighters, they found the swarm is improving performance if the data provided by the swarm is relevant and it is important to let the decision-making to humans.

### 3.3.2 Mixed Reality Technologies

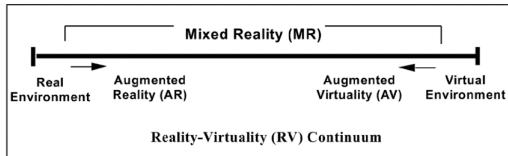


Figure 3.1 Virtual Reality and Augmented Continuum Milgram

Milgram defined the concept of AR as the overlaying of visual information into the real world [47]. Display of a hologram in a real room corresponds to the left side of the scale (figure 3.1), considering it's based mainly on a real environment. Conversely on the right part of the scale, VR cuts off all interaction from the real world to immerse users in a different and synthetic reality. The concept of “*Mixed reality*” (MR) at the centre of the scale repose of using information from real environment (room configuration, use of real objects) to display digital information.

Navigation through AR implies the use of interfaces, defined by Hookway [34] as a bridge between human experience and allowing actions that it can't undertake alone. Companies such as Microsoft [45] or Apple [4] designed their own “user-friendly” AR interfaces for support like a computer or mobile device. Their solution is based on a 2D interface (e.g., touch screen) whereas AR using HMD includes the use of the third dimension. Argenta et al. designed interface to support tactical (military) missions and consider gestures, voice and touch with AR [5]. Bertrand et al. reviewed this change of dimensions with common interface principles like e-mail applications [9], they made adjustments to perform a pleasant and intuitive interface in 3D AR environment.

For interactions in AR, the first design of the augmented reality headset using the fingers of the hand as an interaction tool was made by Goos [56]. It was one of the first researchers to submit the prototype of an AR HMD. Their design consists of a user menu displayed on the hand, superimposing a button on each of the fingers. The user can then select by placing the index finger of the other hand on a button. Today, we can interact in AR using emerging technologies with headsets in different ways. By using the gaze to select elements [2], recent AR headsets now support voice recognition and the tracking of user’s hands and eyes with Hololens 2 [46] and Magic Leap 1 [43]. However, the field of view of HMD remains limited today. People can now create holographic content on a computer and stream it directly to a HMD via network by Park et al. [50]. The latter proposed the idea as a solution to relocate computations and so enhance performance.

Das and his or her partners worked on a very complete system for improving the situational awareness of military agent to analyze environments using a swarm [22]. Unfortunately, they just mentioned AR for simple visualization and didn’t use AR for the improvement of situational awareness. In another work, the same authors used a headset sensor to control robots [23]. They detect the movements of hands to place passage points to guide robots. Their objective was to design a human-machine interface adapted in mixed reality to control a machine architecture. The interface wasn’t designed for emergency environment. Cousins et al. and Brizzi et al. interacted on AR for teleoperations with different arm robots [20] [10]. With the improvement of AR, Trzcielinski et al. found that humans learned faster to control the robotic arm thanks to augmented reality technology using a HMD [58]. The teleoperation was adapted here for learning and not for use in concrete situations. Patel et al. researched about controlling a swarm of small robots using AR with a tactile computer [53] [52]. They made a comparison between robot-oriented and environment-oriented methods using AR with one or multiple participants at the same time.

Looking at the research on Mixed Reality technologies and emergency operation, we observed

that some of AR applications were made and adapt for teleoperation, but not for users in emergency situations and not designed to reduce stress load. HMD nowadays can be efficient to improve humans situational awareness and our goal is to know if AR can help during emergency cases controlling a swarm of drones. Is AR using HMD capable of assisting humans during an emergency operation? Knowing that the field of emergency regroups various types of situations, we decided to focus on firefighters operation in fire in a High-Rise Building (HRB). Recently Sullivan et al. developed a first AR application using the functionalities from the headset Magic Leap 1 for managing a swarm [57]. They explored the methods of giving orders to the swarm and didn't focus of the data provided by the swarm.

### 3.4 Methodology and Experimentation

#### 3.4.1 Firefighters of Montréal (SIM)

Conan [18] surveyed and analyzed the habits and procedures of professional firefighters of Montréal. In particular, three main problems have been identified in case of a high-rise building (HRB) intervention. For each problem, some important information is referenced in the table 3.1.

1. **P1 - Location at all times:** Location is generally one of the critical and fundamental points of the emergency services, especially for firefighters where there is a lack of visibility between the coordinator and all the firefighters during a fire.
2. **P2 - Evolution of the flames:** Obtaining the maximum amount of information about an emergency operation is important for the progress of the mission. This includes the visualization of the situation from various angles.
3. **P3 - Optimization of understanding:** In emergency situations, operations generate information to process for humans. Therefore this implies a consequent information processing to facilitate the understanding of the situation in which firefighters find themselves.

#### 3.4.2 Objectives

Our goal is to evaluate the effectiveness of AR with the use of a HMD during a virtualized fire operation in a HRB. From our literature review in the previous section 3.3, we studied these hypotheses:

1.  $H_{a1}$  - This interface in AR allows for a better understanding of information in the field of emergency response.

Table 3.1 – Firefighters' questions on fire emergency in HRB

Field	Questions
P1	Where are the firefighters in the danger zone?
P2	Where's the seat of the fire? How will the intensity of the fire progress in a short time? (louder/weaker)
P3	<p>How many human and animal casualties are there, and where are they? What are the different needs :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. water</li> <li>2. man</li> <li>3. material</li> <li>4. aerie (air)</li> </ol> <p>What is the situation in the risk zone?</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Where are the load-bearing walls?</li> <li>2. What are the building materials used?</li> <li>3. What is the layout of the pipes?</li> <li>4. What is the plan of the area?</li> <li>5. Where are the emergency exits?</li> </ol>

2.  $H_{a2}$  - This interface in AR improves situational awareness.
3.  $H_{a3}$  - This interface in AR makes decision-making easier.
4.  $H_{a4}$  - This interface in AR makes it easier for mission objectives completion.

First we understood the needs of Montréal's firefighters (SIM). Then we designed an AR application managing swarm drones for critical situations based on our research. To support our assumptions, we also designed a scenario for simulation with a fire in HRB. We confronted technology including an AR application for HMD with a simple computer software to manage a swarm in stressful situations. We tested our scenario case with people of different kinds of ages and experience to get their feedback about our work. This section contains the needs of firefighters in real case, the conception of our application, the designed simulation scenario and methods for evaluating our experience.

Regarding the questions mentioned in the section 3.4.1, our technology uses an ad hoc network, it is possible to geolocate (without the presence of mobile networks or internet) all the electronic tools that can be either attach on robots or present on humans to obtain in real time the position of each. In order to understand the whole situation and to act quickly, UAVs composing the autonomous system are technologies with great ease of movement that allow to quickly photograph and map the area. Managing this data then displaying it on a 3D and 2D medium must increase knowledge of the issues in the field.

### 3.4.3 Proposed Technology

We created an AR application where the user controlled an AS composed by drones. These drones have cameras for mapping. Each of these UAVs achieves a common objective, they evaluate the work in order to reduce the time cost of the mission. All this infrastructure communicates under an independent ad hoc network developed by the industrial partner Humanitas Solutions allowing deployment without the use of internet or mobile network. To lead this swarm, we propose a combination of an AR HMD to assist human supervision and a touch-sensitive tablet acting as a mission planner.

This combination of these two synchronized technologies send actions and receive information from the UAVs. On the one hand, the tablet allows the UAV to act as a mission planner from a screen, i.e. to plan mapping and building analysis missions, but also to send the objectives of these missions to the UAV, which shares the tasks independently. The mission planner also obtains information from the UAVs to inform the user of the status of each robot. On the other hand, the headset allows the user to view the data by hologram in the real environment in three dimensions. The user is able to see the information in an innovative way and positions it in the real world in order to facilitate and accelerate the consumption of information. The proposed technology consists of an Augmented Reality Mission Planner. A representative schema can be found in the figure 3.2. The objective of our proposed technology is to reduce humans' confusion and to maximize user situational awareness.

We devised an experiment to put our technology to the test. The possible actions were divided into interactions from the headset or tablet (hands-based mainly). These interactions were necessary to consume information from the machines and to generate guidelines for the swarm. For this purpose, static, dynamic and situational tools have been developed to improve the users' situational awareness in an emergency operation. These tools responded

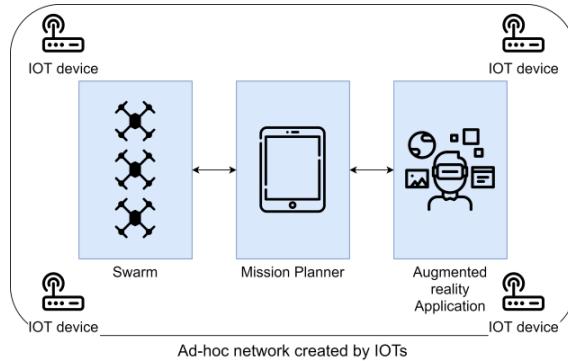


Figure 3.2 Diagram representative of a use case with the system to improve situational awareness

to information needs during an emergency mission. Each tool was represented in two or three dimensions (2D/3D) depending on the type. A schematic example of a use case can be found in the figure 3.3, the standalone system mapped a designated area to retrieve information. The person could use various actions to interact in a 3D AR universe to process information or send commands to the system. The user could interact around him with an interface, but could also visualize information in AR at the building area. He also used the mission planner on a 2D surface for more efficient actions.

Our application regrouped different kinds of widgets. We proposed tools listed on the table 3.2 as proper awareness improvement of the user. Widgets were also conceived for receiving data from the swarm and controlling it. Widgets could be placed all around the user (180 degrees in front of him). They could be easily dragged and dropped around the user using the participant's hands. We tried to imitate some mechanics from common computer actions (reduce windows, drag windows) to allow some freedom to the user in the interface and also to remind him moves that he already knew from using actual technology. The figure 3.4 shows the representation of widgets. The application is directly synchronizing with the mission planner (tablet) and communicates through the ad hoc network of industrial partners allowing the system to work in every situation without 4G/5G mobile or internet. The mission planner acts as a main receiver which transmits information to the HMD. If necessary, the HMD sends command to the mission planner which transmits to the swarm.

To simulate a real environment and test our work, Square Victoria in Montréal has been reproduced in a virtual 3D environment and allowed us to experiment our emergency scenario in an environment close to reality. Virtual drones were inside the virtual environment using their real GPS coordinates. A four-story high-rise building (HRB) was created to set up a fire simulation. A virtual fire started in the building, and a swarm of UAVs was available to follow the mission planner's instructions to scour the building. The figure 3.5 is a representation

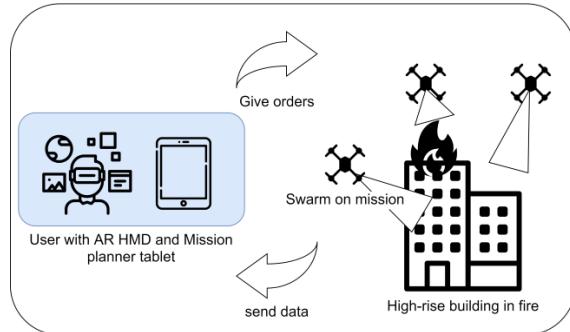


Figure 3.3 Representation of the sending and receiving of information in augmented reality to the autonomous system in action

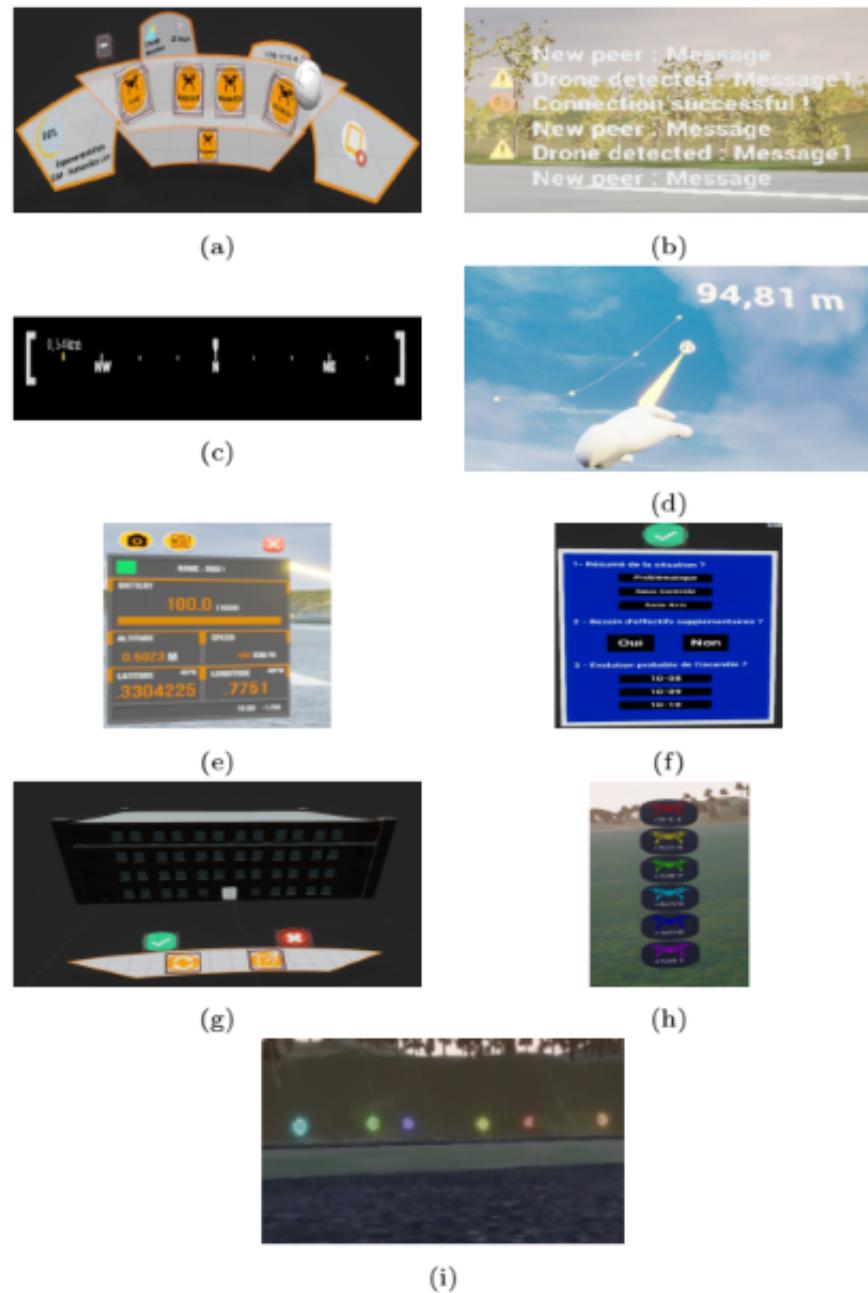


Figure 3.4 Image of different widgets from the application (a) Main menu (b) Notification (c) Situational compass (d) Mission creation (e) UAV data (f) SIM form (g) 3D model (h) UAV List (i) Improved Visibility

Table 3.2 – List of widgets of the application and resume of them

Name	Details
Main menu	Main menu of the application including widgets activation and settings control to move widgets
3D Model	Display 3D models dynamically for helping user to observe the situation
Mission creation	Adding a series of waypoints to create a path for the swarm to follow
Notification	Different kinds of notification to alert the user of some events
UAV list	Allow drone selection by looking directly at or by selecting it from the list containing all drones in the swarm
UAV data	Panel containing all information about the drones, like GPS coordinate, battery level, speed, and pictures taken from the camera
Situational compass	Situational widgets helping user to locate himself in the environment containing distance and location of all drones and mission
Improved visibility	Extra visibility for swarm by colour highlighter and missions to improve tracking in the real world
Firefighters SIM form	Specific form adapted for SIM operation with fire building case



Figure 3.5 The Square Victoria Square built by the Industrial Partner Humanitas Solutions

of the virtual space of the place. The figure 3.7 contains the representation of the complete infrastructure of our experience.

Our technology is an application developed with Unreal Engine 4.24. We used the MagicLeap 1 from MagicLeap as AR HMD [43]. Our contribution regroups the augmented reality app and a network communication plug-in designed for the ad hoc system. The industrial partner Humanitas Solutions created the mission planner application using Unity 5. An Amazon fire tablet was used for the experience. Drones were virtually deployed as Docker-based simulation agents through Humanitas Solutions' Hyper-X-Space (HxS) rapid development platform<sup>1</sup>. Each simulated drone is composed of i) a software-in-the-loop computing element running the embedded swarming intelligence (related to the work of Karydes and Saussié [36] and Costa et al. [19]) and ii) a software-in-the-loop PX4 flight controller, which is defined as a peripheral element. The AR headset and the mobile mission planner could communicate with the simulated drones through a bridge powered by Humanitas Solutions' ad hoc networking technology. Every 3D virtual world was also designed by them.

#### 3.4.4 Context of the Simulation

To experiment our technology and to validate our assumptions required elements that may be hazardous to human health. It wasn't possible to test our technology in real life situations during the COVID-19 pandemic. Initially, the objective of this experiment was to test the effect of AR by using a headset to direct a swarm of autonomous UAVs using a mission planner (tablet) to inspect the surroundings of a burning building to retrieve important information. Instead we used a video projector on a giant screen to display the virtual environment in figure 3.6 containing critical elements of the emergency scenario involving a HRB caught by flames. The user was positioned in front of this immersive screen. Equipped with the headset and mission planner, the AR was calibrated to operate over the virtual display. For the experience, the user didn't need to make any movements and had an overview of the situation.

Considering the COVID-19 pandemic, we adapted our experiment for testing our technology. We experimented with participants of Polytechnique Montréal University without knowledge of emergency situations. We reviewed our tests to set up a stressful situation with our technology. We virtualized a building on fire and used the swarm of UAVs to patrol around it. The participant had to manage and understand the feedback of the real-time swarm with a technology he was not familiar with over a short period of time. We removed the mission planner tablet tool and the swarm was completely automatic and did not receive

---

1. [www.hxs.ai](http://www.hxs.ai)



Figure 3.6 Pictures of virtual environment (a) HRB in fire (b) Sample of virtual people in help

any orders from the user. We mainly focus on understanding the situation using information consumption tools. To evaluate the AR performance, we also developed a similar application for 2D computer to compare the situation using the two technologies in our emergency experience.

We virtualized a HRB caught in a fire containing virtual injured people. The participant was accompanied by an autonomous system composed of 4 drones equipped with cameras patrolling the building from the outside. The challenge for the participant was to retrieve multiple information linking knowledge and location in a limited time in order to simulate a complex and stressful situation. The participant needed first to indicate the location of the source of the fire as accurately as possible. Then he or she reports the number of adults and children people seen in the building. And finally, for each kind of person, the participant needed to specify the most precise location as possible (Example: "I saw a child on the 3rd floor of the building, he was on the northeast side of the building very close to a window").

A mission had a 6-minute time limit. The participant needed to report everything he or she observed on a report to assist in a firefighter intervention. The movement of the drones from the swarm was totally autonomous in order to patrol simultaneously around the building providing the participant with several "real time" video feedback. In order to compare the AR performances, the user experienced two different missions and for each situation he used a different monitoring system. From the figure 3.7, the first one was a workstation or personal computer (PC) with a "traditional" 2D 24-inch monitor screen from computer receiving data in real time including videos of the drones in order to perceive the location of the drone's position. The participant used the 2D monitor and the view of the simulation environment from the video projector to improve the participant's situational awareness and report what

he understood. The second was based on work with an AR headset in order to develop our studies and establish an efficiency comparison with the first system. The participant was equipped with an AR headset. As in the first case, the drones sent information and the user used the tools at his or her disposal with 3D hologram's visual environment to understand the situation and report as much as he or she learned. For this experiment, we had two different configurations for the exercise (number and location of people, fire location) to avoid any form of repetitiveness. Half of the participants started with the AR while others start with the PC to avoid any significant order bias in the tests. The same applies to the order of the two fire configurations used. Representations of our experience are shown in the figure 3.8.

Our experience was composed of three software applications developed with Unreal Engine 4.24. We used our proposed technology to create this exercise. First we made a Windows application containing the building on fire, virtual drones and virtual people according to the "real field" emergency environment. This was projected onto a projection screen (image (a) of figure 3.8). The second app was the AR Lumin application for monitoring the swarm and contained widgets of our work. Finally, the last software application was an arrangement of the widgets we had but adapted to a windows software for PC using the mouse and keyboard. These applications communicate through a single private network.

Before each mission, a short training session was conducted beforehand to initiate the user with the software. He or she started the exercise by facing the projection screen displaying a HRB composed of 4 floors and 4 drones.

The participant didn't need to move around during the exercise. Only the virtual drones moved. As the mission started, the fire appeared and the drones started their turn. The monitoring technology received video feedback and location from each drone throughout the exercise. Each UAV circled the building from outside on a specific floor, meaning that drones were on the same position but at different altitudes. Video feedback was unique from each drone. The swarm patrolled twice around the building for 4:30 minutes and then the mission stopped. The limit duration of a mission was 6 minutes but participants were allowed to stop earlier. Then they needed to complete a mission report for each mission and at the end fill a questionnaire to get subjective opinion on the course of operations and technologies.

Both technologies had the following capabilities. Applications contained video feedback information on the status of the 4 UAVs simultaneously. A mini-map with an upside view was displayed containing positions of UAVs all around the building with cardinal points. Target buttons were available for each drone to save drone location and mark its position on a mini-map. It was possible to focus on a particular UAV by selecting it. The particularity on the PC was that all those tools were on one screen whereas widgets were displayed in front of

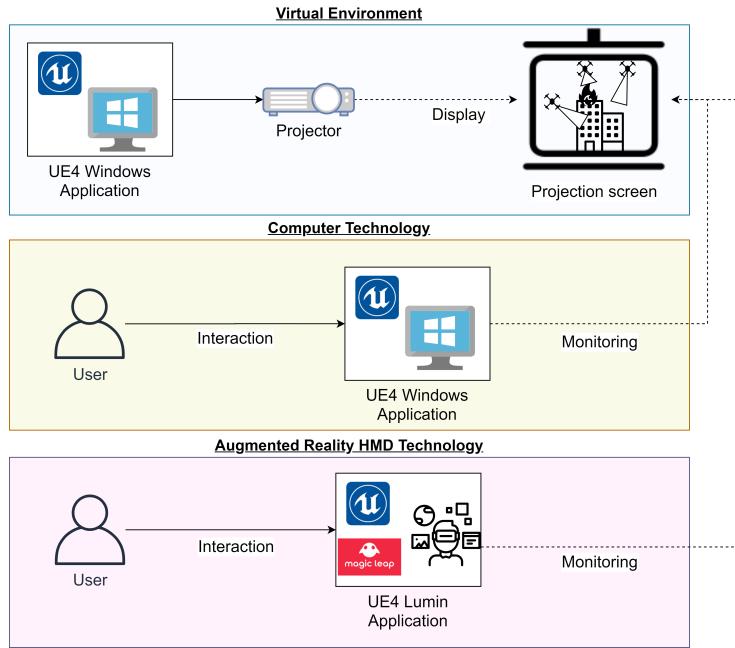


Figure 3.7 Complete Infrastructure of the Simulation

the participant in AR. Selection was with the mouse on the PC and the index finger touch in AR. The augmented reality added a main menu and possibilities to improve visibility of UAVs and also their trajectories around the building over the projector rendering. Virtual environment and AR applications are shown on figure 3.8.

### 3.4.5 Evaluation

The scenario in section 3.4.4 has been designed to obtain a response to the assumptions made in the section 3.4.2. First we evaluated a score depending on the results of all participants from each mission. Raw results were processed to measure the efficiency of the operations according to the technologies used and to obtain a percentage success score. Each question was evaluated according to a score indicated below. This score resulted from the following correction in the table 3.3. From this table, the final score of each participant was a sum of every section for a total of 17 points converted in a percentage.

We also analyzed the subjective opinions of participants regarding their feelings on the use of the different technologies. The questionnaire in the table 3.4 contained questions directly related to our assumptions to understand the experience of participants. Each question in the table 3.4 was answered with values between 0 and 5, with the following meanings:

0 - No review

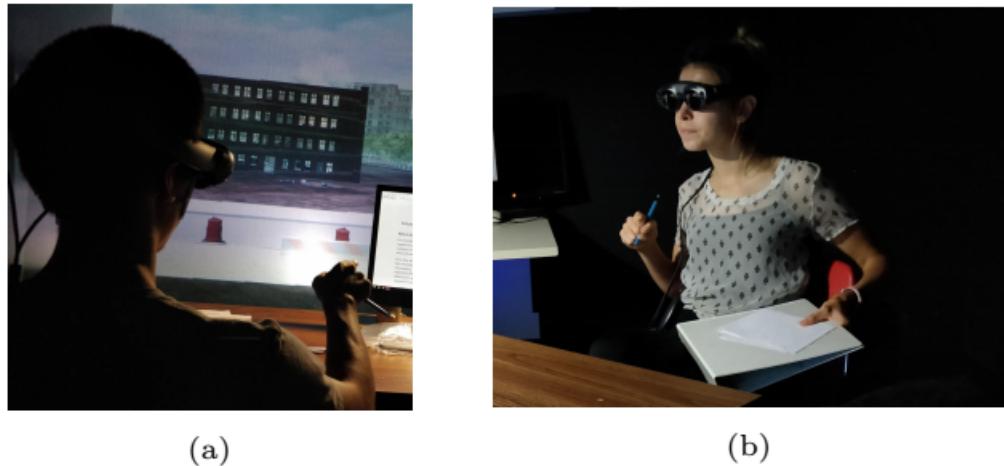


Figure 3.8 Experimentation with Magic Leap 1 (a) User interaction during the mission (b) Side view of the user during experience

Table 3.3 – Evaluation of participants' feedback results during experience

<b>Score</b>	<b>Location of the fire outbreak</b>
4	Accurately indicated location (correct floor and approximate floor location)
3	Location indicated without precision (good floor only)
2	Location indicated with a precision error (good floor and bad location)
1	No indication
0	Wrong location (wrong floor)
	<b>Number of adults present in the building</b>
4	Exact number
3	Exact number around plus or minus 1 person
2	Incorrect number less than at least two persons
1	No indication
0	Incorrect number greater than at least two persons
	<b>Number of children present in the building</b>
4	Exact number
3	Exact number around plus or minus 1 person
2	Incorrect number less than at least two persons
1	No indication
0	Incorrect number greater than at least two persons
	<b>Average of each response on each person's location</b>
4	Precisely indicated location (correct floor and approximate location on the floor)
3	Location indicated without precision (good floor only)
2	Location wrongly indicated but with the good floor
1	No indication
0	Wrong Location with the wrong floor
+0.5	Bonus: People correctly identified (adult or child)
	<b>Operation time</b>
1	Participant finished the exercise before the 6-minute time limit
0	Participant completed the exercise at the end of the 6-minute time limit.

- 1 - Totally disagree.
- 2 - Rather disagree.
- 3 - Neutral
- 4 - Pretty much agree.
- 5 - I couldn't agree more.

It was useful to measure the user's cognitive effort in order to understand the complexity of the tasks and to assess whether the information was correctly processed by the proposed system so that it could be easily understood. On the one hand, it helped to understand the level of difficulty experienced by the participant in terms of the physical use of the technologies. On the other hand, it improved the management of all the information and actions to be undertaken for the mental effort. Our questionnaire contained questions to also compare the comfort of both technology and especially with the experience with augmented reality systems. For each question, an additional field was present to collect comments in order to detail the answer choices. Another field was also included to collect additional opinions and comments from the participant.

Hypothesis validation criteria were needed to validate our research questions. The table 3.5 contains the set of validation criteria.

### 3.5 Results

For the proposed experiment comparing PC and AR.  $N = 24$  participants with no experience with AR at all and no familiarities with critical situations were asked to understand a situation where HRB took fire. The repartition of participants was 33% of women and 67% of men with no familiarity with AR with an HMD. They had to gather as much information as they feel possible in a short amount of time with a software application they never used before. The mission was to report multiple types of information including fire location, number of adults and children inside the building with locations for each person within a time limit of 6 minutes. We set up a stressful situation by having the participant do the exercise with unknowns, much feedback during the exercise and pressure to accomplish the mission in a short amount of time. Each participant had to complete the exercise twice. On each mission, the exercise was different (we set up two different fire scenarios). Half of the participants started with AR while the other half started with the PC to get different feedback. For each mission, they reported what they learned which results a score by the sum of each point earned depending on how right the information was (correction listed in the table 3.3). The score, on a scale of 0 to 17 points is the sum of each section. We converted that into a

Table 3.4 – Personalized questionnaire for our experiment

<b>1</b>	<b>Technical questions on the proposed Augmented Reality technology</b>
1.1	Interacting with the hands on the buttons in augmented reality was simple and intuitive.
1.2	Information from the drones that make up the autonomous system was relevant.
1.3	Viewing the video from the UAV cameras in augmented reality was easy.
1.4	The mini-map tool (2D map) in augmented reality was useful.
1.5	The UAV fact sheet tool was useful.
1.6	The superimposition of AR on the simulation environment enhanced a better understanding of the operation of the UAV system and the situation.
1.7	AR had allowed me to be more confident in my decisions during the exercise.
<b>2</b>	<b>Issues about system difficulty</b>
2.1	Generally speaking, AR tested for the experiment was simple to use as a first experiment.
2.2	Overall, the 2D computer station technology tested for the experiment was simple to use.
2.3	Subjectively, what technology you enjoyed most about exercising.
<b>3</b>	<b>Logistics Issues</b>
3.1	AR had not obstructed my vision in the real world when I needed it.
3.2	Wearing the headset on my head had not obstructed my movements in the real world.
3.3	Wearing the helmet on my head had not bothered or hurt me.
<b>4</b>	<b>Questions on Research Issues</b>
4.1	I found that there was a lot of information and the experience was difficult.
4.2	For a first use, I didn't have too much difficulty to adapt myself with the AR technology.
4.3	AR allowed me to understand as well or better the situation compared to the computer.
4.4	I was not confused during the experiment.
4.5	The simulation scenario was relevant.
4.6	I found the experiment interesting.

Table 3.5 – Criteria for validating the assumptions made

Hypothesis	Validation criteria
$H_{a1}$	Question 1.1 $\geq 3$ Question 1.2 $\geq 3$ (Question 1.3 + Question 1.4) / 2 $\geq 3$ Question 2.1 $\geq 3$
$H_{a2}$	Question 1.5 $\geq 3$ Question 3.1 $\geq 3$ Question 3.2 $\geq 3$ Question 3.3 $\geq 4$ Question 4.3 $\geq 3$
$H_{a3}$	(Question 1.6 + Question 4.2) / 2 $\geq 3$
$H_{a4}$	Question 4.2 $\geq 3$

percentage of success (0 to 100%) for readability. The figure 3.9 shows the average score for each technology depending on when they tried a given technology for the first time or second one. In order to measure any improvements between the use of technology depending on if it was used of first or second attempt, we computed an average for each type of information reported by participants depending on what they tried first. The figure 3.10 represents the average score converted in percentage for each section of the mission report to analyze the improvement for both technologies and make a comparison.

At the end of the test, participants were asked to fill a personalized questionnaire in the table 3.4 to have some feedback from the experience and understand their feelings. The average of all answers of these questions (between 1- strongly disagree to 5- strongly agree) is reported on the figure 3.11.

### 3.6 Discussion

We tried to measure the usefulness of AR to manage an emergency situation using a complex system. Instead of testing our work with firefighters due to COVID-19 related complications, we adapted our experience with people without experience in urgency situations. We put the participant in a stressful situation instead of simple simulation exercise by using a short complex mission with the pressure of a strong and intense flow of information. The participant used our technology and also a PC to compare the relative performance of augmented reality. It was important to create a feeling of pressure in this situation to have a real feedback from the participant under pressure during the exercise with both technologies. It was obvious that the second attempt was to be more comfortable and less stressful than the first one, but we used that to measure the improvement of the technology after a second try and evaluated

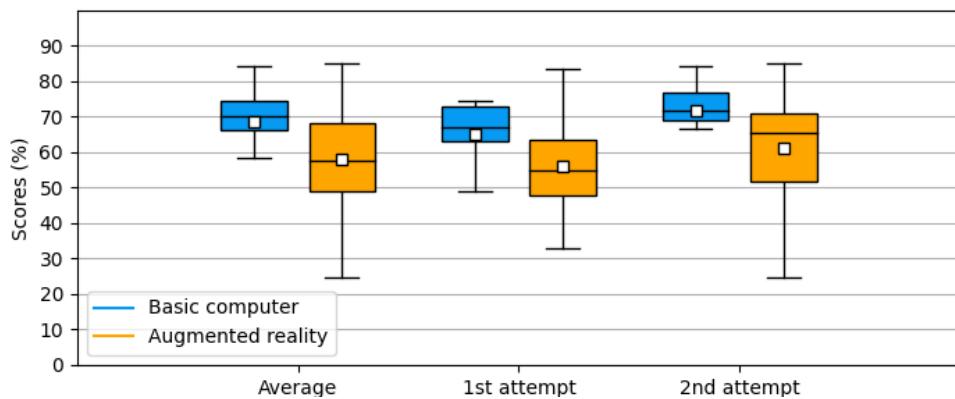


Figure 3.9 Box plot of missions' results by technology

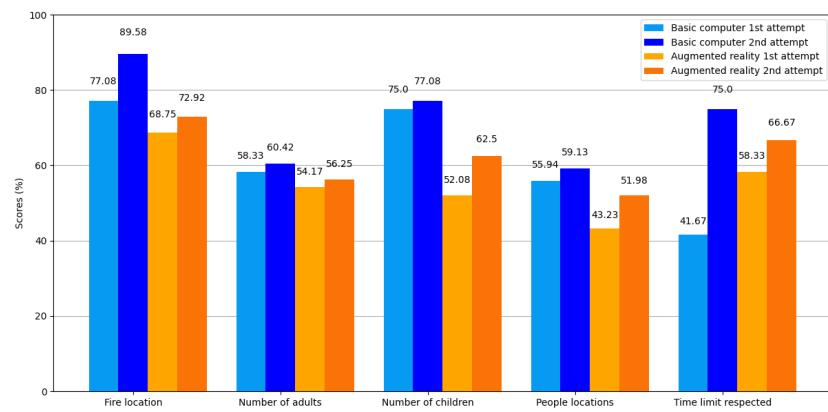


Figure 3.10 Details of missions report results

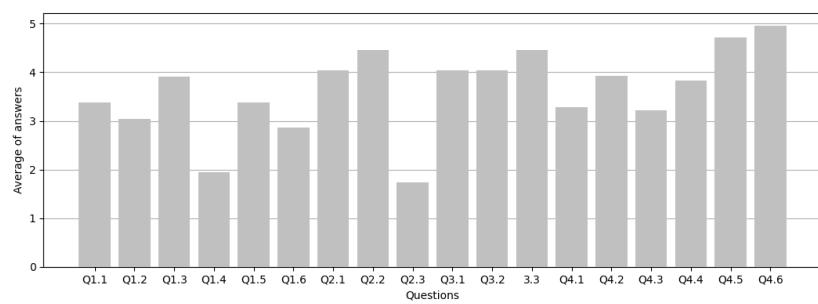


Figure 3.11 Responses of personalized questionnaire

the progress between PC and AR. We also took into account the interaction method in our work in augmented reality was fully based on hand interaction without a controller and was a first-time experience for each participant.

Because each participant needed to do two exercises, two different missions were designed for the experience. Every information was different regarding the mission but the difficulty of both were equivalent. There was no important difference according to the score of each technology for each kind of mission. Both missions were used for both technologies and both attempts.

According to the boxplot figure 3.9, the average (white square) of the PC and AR in general is respectively  $M_{bc} = 68,44\%$  and  $M_{ar} = 58,01\%$  showing a small difference of  $M_{bc} - M_{ar} = 10,43\%$ . This figure contains the minimum ( $Q_0$ ) and maximum ( $Q_4$ ), the median( $Q_2$ ), the first and third quartile ( $Q_1, Q_3$ ). If we check the top 5 best scores we had among all participants, three of them were from the PC and two of them were from the AR headset with a score between 82% and 89%. Despite the fact of a small difference, the boxplot results from PC were more stable than AR either the first or second attempt. This stability we explained by the familiarity of people with the computer. People are normally more comfortable with a technology they use every day. But for a first try with a new technology in stressful and difficult exercise, the augmented reality shows here a really good score relatively close to the efficiency of the computer. As an emergent technology, we also see that it could result in very bad score because people took too much difficulty to handle a critical situation with a tool they were not well trained for. In the same figure 3.9, we notice an increase of the averages from first attempt ( $M_{bc1} = 65,12\%$  and  $M_{ar1} = 54,78\%$ ) to the second attempt ( $M_{bc2} = 71,75\%$  and  $M_{ar2} = 61,25\%$ ). Respectively, there is an increase for PC of  $M_{bc2} - M_{bc1} = 6,63\%$  and for AR of  $M_{ar2} - M_{ar1} = 6,47\%$ . It makes sense by the increase of comfort generate by the experience acquired from the first attempt. We explore in detail that the increase is different regarding the technology in the next paragraph. Even if the interquartile range of PC is smaller than AR and justify the stability of the device, the minimum and maximum of boxplots are quite large for the headset resulting a good performance for some participants even in the first try. This shows the possibility that with practice and habit, the performance could be much more stable and even better than the computer.

The figure 3.10 allows a detailed look at the improvement of each technology. These numbers are the percentage of success in each field of the mission report following the indications of the table 3.3. The best improvement of the PC is shown on the fire location and time limit. The PC in blue show a good increase of  $M_{firebc2} - M_{firebc1} = 89,58 - 77,08 = 12,5\%$

compared to the augmented reality with  $M_{fire_{ar2}} - M_{fire_{ar1}} = 72,2 - 68,75 = 3,97\%$  for the fire. "Time limit respected" means if people finished the exercise before the limit of 6 minutes. We saw a huge improvement of  $M_{time_{bc2}} - M_{time_{bc1}} = 75,0 - 41,67 = 33,33\%$  compared to the headset  $M_{time_{ar2}} - M_{time_{ar1}} = 66,67 - 58,33 = 8,34\%$ . But the average time taken by both technologies were really equal around 5:40 at the end. We noticed a similar improvement about the number of adults found ( $M_{adult_{bc2}} - M_{adult_{bc1}} = 2,09\%$  and  $M_{adult_{ar2}} - M_{adult_{ar1}} = 2,08\%$ ). On the last two sections (number of children and people locations), the AR showed a better improvement respectively  $M_{children_{ar2}} - M_{children_{ar1}} = 62,5 - 52,08 = 10,42\%$  and  $M_{location_{ar2}} - M_{location_{ar1}} = 51,98 - 43,23 = 8,75\%$  compared to the PC respectively  $M_{children_{bc2}} - M_{children_{bc1}} = 77,08 - 75,0 = 2,08\%$  and  $M_{location_{bc2}} - M_{location_{bc1}} = 59,13 - 55,94 = 3,19\%$ . In general the PC was always better on performance for all sections here and could improve better at some point. But for a first performance on stressful and difficult missions, the augmented reality headset with new ways of interoperability demonstrated here that performance and improvement are nearly close to the computer for a very first use.

Following the missions, participants needed to answer some questions referred in the table 3.4 to understand their feelings mainly about the usability of augmented reality. The average of answers of each question is shown in the figure 3.11. The first part was technical questions about AR technology. We started to ask about the interaction with the hands on the system on Q1.1, an average of  $M_{PQ1.1} = 3,38$  explains an optimism neutral position on that point. Some participants were really reluctant whereas some people really liked the fact to interact on buttons with their fingers which is really promising for the future. We also ask in Q1.2 how easy it was to read 2D content (a video) in hologram resulting with  $M_{PQ1.2} = 3,38$ . Participants reported that the field of view of the headset is really small and they couldn't see well all video correctly and interact with the system at the same time whereas the computer had everything on the screen and the use of a mouse and keyboard controller are more common. The questions Q1.3, Q1.4 and Q1.5 were about widgets' utility. Q1.3 referred to the mini-map widget which was really well approved to improve situational awareness during missions with  $M_{PQ1.3} = 3,91$ . Q1.4 wasn't considered useful at all with a poor result of  $M_{PQ1.4} = 1,95$ . In Q1.5, overlaying information above the high-rise building and drones was a mitigated solution judged by an average of  $M_{PQ1.5} = 3,38$ . Indeed, the most common specificity of AR is to superimpose digital information on real field. After reviewing our experiment, the participant was sitting and didn't move during the experience restricting the possibility of the functionality. However knowing that limitation proved that a result above the neutral level of 3 is not bad at all. Q1.6 ask the participant of his or her self-confidence by using AR. The answer  $M_{PQ1.6} = 2,86$  indicates that the question was too early after one

use during the experiment and couldn't still be correctly measured at that time. The next part is about the complexity of use about both technologies (Q2.1 referring to AR and Q2.2 to PC). Both results present a really good average with  $M_{PQ2.1} = 4,04$  and  $M_{PQ2.2} = 4.46$ . The last question Q2.3 was about the most favourite technology for the experience purpose, 65,22% of participants choose the PC and 34,78% the AR according to  $M_{PQ2.3} = 1,74$ . This poor result for the headset can be explained by many reasons. To accomplish a difficult mission requires a good self-confidence using a known technology. The headset was a first try to all participants and never used before which brings unknowns and uncertainties about the expected results. Participants seem to spontaneously choose the technology they were more comfortable with in order to ensure the reliability of their results for the mission. Some comments were that the augmented reality could be more favorite on the future if they have more practice with it. The third part of this questionnaire was about the logistics of Magic Leap 1 headset. During the exercise, participants took notes while using the AR or PC. Some of them found out it was difficult to write and see with the system due to the hologram's placement in the software. The question Q3.1 approaches the vision obstruction, Q3.2 about the movement obstruction and Q3.3 on headset-related discomfort or injury from the Magic Leap 1. Every question resulted in good average:  $[M_{PQ3.1}, M_{PQ3.2}, M_{PQ3.3}] \geq 4$ . It was reported that the headset wasn't well suitable for small heads and the cable could disturb a little the use of hands for interaction. But in general, the headset was really well accepted by everyone. The last section was about the experimentation on itself. Q4.1 referred to the difficulty of missions revealing with  $M_{PQ4.1} = 3,29$  that participants were mitigated. It depends again on the self-confidence about the result of each participant. The next question Q4.2 asked if their situational awareness was equal or better in AR compared to the computer.  $M_{PQ4.2} = 3,92$  presented here an important fact that according to people, the headset was nearly equal to the computer and it's a really great proof of opportunity to demonstrate that AR could (with more use) be really accepted by people in general. Q5.3 measured the level of confusion during the test. A result of  $M_{PQ4.3} = 3,22$  shows that missions were complicated but manageable. The last two questions of this form was the relevance (Q4.4) and the interest (Q4.5) of the experimentation. We conclude with  $M_{PQ4.4} = 4,71$  and  $M_{PQ4.5} = 4,96$  participants really liked the exercises and considered relevant the experimentation for the augmented reality technology in stressful conditions.

From this experience and our conditions to our assumptions, we confirm that all of our hypotheses ( $H_{a1}, H_{a2}, H_{a3}, H_{a4}$ ) are valid using our results with the exception of the condition with the mean of  $M_{PQ1.3}$  and  $M_{PQ1.4}$  which is just slightly below the required value. This is explained by the fact that widgets about giving GPS coordinates and information about drones weren't well relevant for the mission. We could say that AR has an opportunity to

make its way into critical situations one day. We saw here that technology could provide good results in urgency operations and provide real-time information in a real situation instead of managing it all from a monitoring station. However, this technology is too emergent for the moment and needs more applications and tests to definitively prove something for the future. Our results showed that people accepted the AR technology and obtained scores really close to the PC even if PC was always better. This does not exclude the fact that with training and more comfort, the augmented reality headset could perform equally or even superior to the computer. Even in a stressful situation with an overflow of information, participants not accustomed to these conditions showed a good accommodation on this new technology with novel interactions. We also see that the improvement in AR was really close to the computer even in a first experiment which is very promising. An important complement to these tests could have been an experience with our first work or another application with people knowing the emergency field and could point out how good or bad that technology could be on a real situation and not during a simulation. Another good way for testing it would be to test this exercise on a real situation outside on a real building simulating people at risk and the fire with real drones and real video feedback. The difficulty to see holograms outside with the sunlight is still a question because holograms are made of light and become really transparent in a lighted field. But we know that technology is increasing day by day really fast and the new augmented reality headsets showed good improvements compared to the Hololens 1.0 in 2016. There is still some time until we see applications like our work used in emergency field, but we hope that this work will help to present the opportunity of augmented reality usage into critical situations.

### 3.7 Conclusion

In this project, we analyzed conditions of Montréal’s firefighters and reported about how new technology using augmented reality could improve humans in critical situations. After the objective’s definitions, we designed and developed an augmented reality application as an interface for an AR headset to improve situational awareness of humans. This interface allowed the user to understand information provided by a swarm of drones with 2D and 3D widgets in a virtual environment and also allowed him or her to control a swarm of drones easily to inspect external areas. To test our work, we set up a simulation with virtual environment and augmented reality in a stressful situation. Our results show that augmented reality has potential to improve the efficiency of humans and improve the success of critical missions.

### 3.8 Acknowledgments

This work was supported by Mitacs [grant number IT10647] and Humanitas Solutions. It couldn't be achieved without Computer Graphics and Virtual Reality Laboratory (LIRV) from Polytechnique Montréal. We also thank Humanitas Solutions team for all their work and support for this project. Icon made by Vitaly Gorbachev, Freepik, Nikita Golubev, Pixelmeetup from [www.flaticon.com](http://www.flaticon.com).

## CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE COMPLÉMENTAIRE

Certaines informations complémentaires qui sont présentées dans cette section font partie du travail de ce mémoire, mais n'ont pas été intégrées dans l'article scientifique. Cette section a pour but de situer le contexte du cadre de cette recherche et de détailler l'ensemble de chaque composante du système dans le but de rendre le projet réutilisable et reproductible. Certaines composantes étaient initialement prévues dans le cadre de l'expérience scientifique, mais n'ont pas pu être utilisées suite à des adaptations de l'expérimentation suite à la pandémie.

### 4.1 Description du système

Le système complet se décompose en plusieurs composantes qui sont décrites ci-dessous. Le simulateur et l'application RA sont les contributions principales présentées dans ce mémoire tandis que les autres composantes ont été faites par notre partenaire industriel Humanitas Solutions.

#### 4.1.1 Réseau HEAVEN

Le réseau de communication de l'ensemble des technologies est appelé HEAVEN «*Heterogeneous Embedded Ad-hoc Virtual Emergency Network*». C'est un réseau de communication ad hoc mobile basé sur Unix développé par le partenaire industriel. Il est indépendant du réseau internet ou cellulaire et peut se déployer en tout lieu et en tout temps depuis des systèmes IoTs Unix appelés «Onion». Chaque appareil se connectant à ce réseau devient un point de relai permettant de diffuser l'information au sein du réseau. Ce réseau correspond à un module logiciel qui utilise les composants réseau de l'objet pour faire fonctionner HEAVEN. Il est seulement aujourd'hui possible de faire fonctionner ce réseau sur tout module basé sur unix. Toutefois, des clients réseau ont été développés pour que n'importe quel système d'exploitation puisse communiquer. Les drones contenaient un module HEAVEN pour se connecter et étendre le réseau.

#### 4.1.2 Essaim de drones autonomes

L'essaim correspond à un regroupement de plusieurs drones qui reçoit des commandes et émet des informations sur leur position et leur avancée dans leur mission. Les drones sont virtualisés en intégrité avec leur système d'exploitation ROS («Système d'exploitation robo-

tique»). Cela permet de facilement travailler et tester les drones pour accomplir les missions. Ils se connectent au réseau HEAVEN et agissent également comme points pour propager la fiabilité du réseau. Les moteurs étant virtuels, le déplacement des drones est visible seulement par leurs messages réseau indiquant leur changement de coordonnées GPS. Ils reçoivent les positions GPS des points de passages indiqués par le planificateur de mission et effectuent leur déplacement en indiquant leur avancement.

#### 4.1.3 Planificateur de mission

Le planificateur de mission consiste en une application Android sur une tablette tactile pour gérer les missions de l'essaim. Il est le premier outil mis en place pour coordonner un essaim au sein de l'écosystème d'Humanitas Solutions. Le logiciel se sert d'une API de Google pour afficher une cartographie en deux dimensions du monde réel. Le planificateur crée des trajectoires optimisées en fonction du nombre de drones disponibles pour couvrir une zone donnée. Cette application sert également de points relais avec le visiocasque sur le réseau HEAVEN pour communiquer avec l'essaim, car aucun module n'a été développé pour que le visiocasque se connecte sur le réseau ad hoc. Des images provenant du planificateur sont présentées à la figure 4.1

#### 4.1.4 Simulateur

Afin de visualiser le parcours de l'essaim dans un environnement en 3D similaire au monde réel, un environnement virtuel simplifie beaucoup d'aspects pour tester le développement. Le logiciel Unreal Engine 4.24 a été utilisé pour recréer plusieurs environnements à taille réelle comme l'aéroport de Bagotville à Québec ou bien la place Square Victoria à Montréal afin de mettre en place des scénarios de test. Pour interpréter les échanges réseau, il a fallu développer un module de communication HEAVEN client en C++ pour connecter le simulateur au réseau afin de recevoir les données du planificateur de mission et de l'essaim. Le partenaire industriel s'est chargé de créer des environnements du monde réel pour le simulateur tandis que nous nous sommes chargés de développer l'interprétation du simulateur pour la conversion des coordonnées GPS en repère local, le déplacement des drones et l'ajout de l'affichage des points de passages pour les drones. Nous nous sommes servis de ce simulateur virtuel pour intégrer dès le départ le contenu RA pour avoir un seul système regroupant simulation et réalité augmentée.

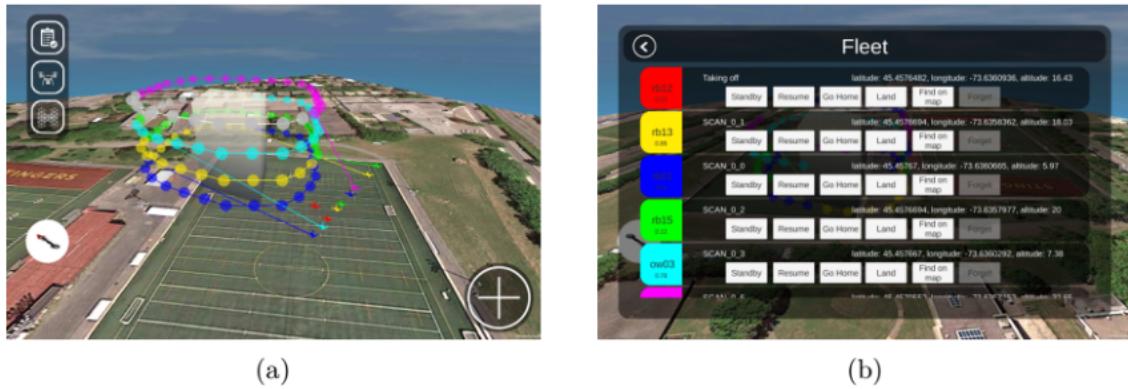


FIGURE 4.1 Images provenant du planificateur de mission (a) Visualisation du parcours de l'essaim (b) Liste des drones

#### 4.1.5 Application de réalité augmentée

Comme expliqué dans la section 4.1.4, les premiers développements de l'application de réalité augmentée étaient intégrés au simulateur. Les premiers tests pouvaient dès le départ être testés en réalité virtuelle avec un visiocasque fermé en immersion dans le simulateur. Il était possible d'interagir avec les premiers outils de réalité augmentée pour comprendre le fonctionnement de l'essaim et envoyer des commandes à celui-ci. Lorsqu'il était nécessaire d'envoyer des commandes aux drones, le simulateur redirigeait sa demande vers le planificateur de mission qui envoyait la commande à l'essaim. Les détails du développement des outils de l'application se trouvent dans la section «*Proposed Technology*» de l'article scientifique chapitre 3. Pour intégrer l'application au visiocasque, on retirait l'aspect du simulateur et on gardait les informations visuelles avec le traitement informatique nécessaire pour que l'application puisse basculer facilement entre réalité virtuelle et réalité augmentée pour le développement. Les interactions se faisaient uniquement par l'utilisation des mains. Il y a eu une adaptation spécifique pour le casque Hololens 1.0, car il ne permet pas de suivre et détecter les mains de l'utilisateur. Les cartes étaient intégrées en échelle réelle ce qui permettait de récupérer correctement les emplacements des drones virtuels dans le simulateur et observer leur déplacement. La figure 4.2 représente une version du simulateur et une version du simulateur adaptée pour le Hololens 1.0. En réalité virtuelle, nous avons utilisé la technologie Leap Motion de Ultraleap [1] qui permettait par infrarouge de suivre les mains et d'interagir avec en réalité virtuelle.

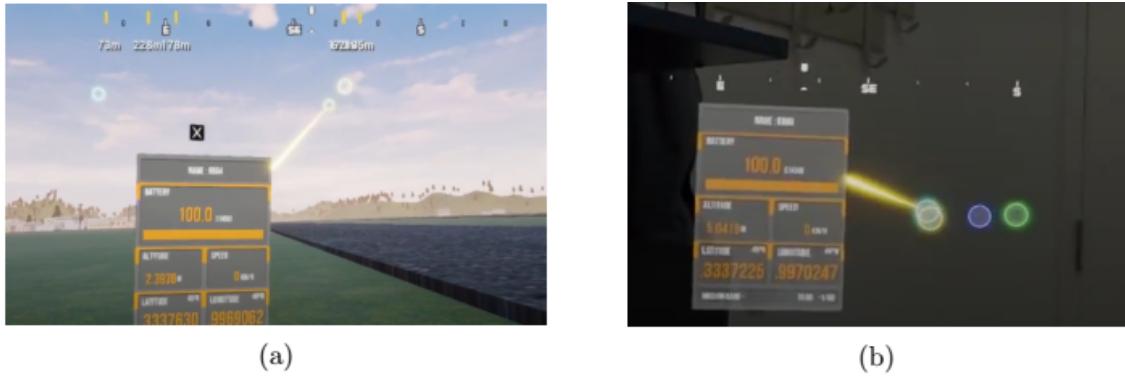


FIGURE 4.2 Images provenant du planificateur de mission (a) Simulateur et réalité augmentée (b) RA sur Hololens 1.0

## 4.2 Expérimentation en terrain réel

Après avoir expérimenté en simulation, l'équipe d'Humanitas Solutions a fabriqué leurs propres drones afin de tester leurs développements et leur système d'exploitation en extérieur. Le but étant de contrôler plusieurs drones par l'intermédiaire de la RA et du planificateur de mission, nous avons donc testé les drones en extérieur pour vérifier de la précision de la localisation GPS et à la stabilité des drones dans leurs missions. Des représentations sont incluses à la figure 4.3. Après plusieurs tentatives, les drones rencontraient de multiples échecs de stabilité et le capteur GPS ne démarrait pas à chaque démarrage. Cependant le réseau était fonctionnel et lorsque le signal GPS était reçu, il était précis à quelques mètres près. En initialisant manuellement la coordonnée GPS du visiocasque, nous avons pu observer les informations en RA des drones à l'extérieur. L'expérience a été faite avec le Hololens 1.0 et plusieurs remarques sont à faire : tout d'abord la visualisation des drones était plutôt correcte sur les drones en sachant que la réalité augmentée était décalée de quelques mètres à cause de la précision GPS. Au niveau de la luminosité extérieure, les tests ont été faits en plein jour et les hologrammes restaient quand même bien visibles à l'utilisateur. Cependant le casque avait vraiment du mal à se repérer au sein de l'environnement extérieur et lors d'un déplacement du visiocasque autour du drone, la position dans le repère privé du visiocasque devenait erronée et celui-ci n'arrivait plus à se positionner correctement. Après plusieurs difficultés dues à la stabilité des drones sur leurs missions, les tests ont été arrêtés.



FIGURE 4.3 Images provenant de l'expérimentation en terrain réel

### 4.3 Simulation d'urgence

Cette section présente les différents travaux effectués pour expérimenter la réalité augmentée en situation d'urgence. Cette section inclut également des informations additionnelles sur l'expérimentation décrite dans l'article scientifique au chapitre 3. Elle contient enfin le déroulement du scénario initialement prévu pour expérimenter avec le SIM.

#### 4.3.1 Étude sur les différents choix de simulation

Il n'était pas possible de tester notre technologie en situation réelle, car la mise en place d'un incendie aurait été trop compliquée à mettre en place pour cette expérimentation. Toutefois il est possible que des tâches connexes comme la virtualisation de certaines composantes permettent de créer un environnement de simulation. Plusieurs configurations de virtualisation étaient possibles pour cette simulation, car des éléments pouvaient être virtualisés soit dans l'environnement virtuel ou alors en RA. Pour les informations qui suivent, nous avions à la base prévu de mettre en place une expérience avec le visiocasque et le planificateur de mission avec le SIM. L'utilisation du planificateur de mission était donc prévue dans notre étude, mais lors de l'expérience, les participants ne l'ont pas utilisée. Les trois configurations possibles sont listées dans la figure 4.4 et énumérées ci-dessous :

1. Virtualisation complète de toute la technologie et de l'environnement de simulation dans un visiocasque de réalité virtuelle.
2. Utilisation de la technologie prévue et affichage de l'environnement de simulation sur un écran immersif.
3. Utilisation de la technologie prévue dans un environnement réel et virtualisation de certaines composantes de l'environnement dans le visiocasque de réalité augmentée.

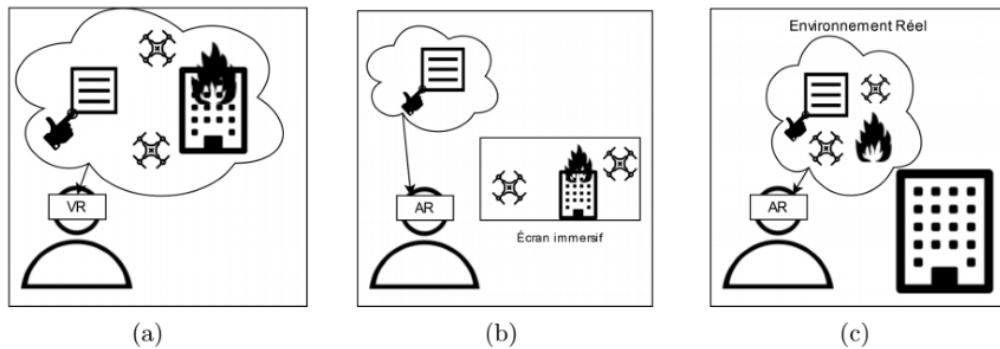


FIGURE 4.4 Schéma des différentes configurations possibles pour l'expérience (a) Virtualisation complète (b) Technologie et simulation (c) Technologie et milieu réel

### Virtualisation complète

Cette configuration consistait à plonger l'utilisateur totalement dans l'environnement virtuel : transposer l'interface RA en RV et adapter les moyens d'interaction. Il était simple de transposer car le simulateur contenait déjà tous les outils nécessaires. Ce choix était une méthode plus pratique pour faciliter la logistique de la simulation, mais contenait certains désavantages dont de virtualiser l'utilisation du planificateur de mission en environnement virtuel. Le tableau 4.1 recense les points positifs et négatifs de cette configuration.

TABLEAU 4.1 – Avantages et désavantages de la virtualisation complète de la logistique

<b>Avantages</b>
1. Nécessite seulement un visiocasque de réalité virtuelle.
2. Demande un espace restreint pour la simulation.
3. Environnement très immersif pour la simulation.
4. Permet de se déplacer virtuellement sur de longues distances.

<b>Désavantages</b>
1. Demande un travail de portage du planificateur en réalité virtuelle.
2. Nécessite une très bonne résolution de visiocasque pour lire les informations du planificateur.
3. Nécessite un développement supplémentaire afin de virtualiser le planificateur fonctionnant simuler un ordinateur tactile.
4. Très peu représentatif du système prévu, car tout est virtuel.

## Virtualisation partielle et utilisation de la réalité augmentée

Dans ce cas-ci, seul l'environnement de simulation est virtuel et il pouvait être affiché de plusieurs façons. On pouvait se servir d'un affichage sur un écran géant incurvé ou utiliser une technologie plus complexe comme la CAVE en se servant des vidéoprojecteurs. L'application avec un visiocasque RA pouvait dans cette configuration fonctionner et elle serait calibrée pour fonctionner sur l'affichage de l'environnement comme si celui-ci correspondait à la réalité. Pour la simulation, l'utilisateur devrait toujours se trouver devant la situation d'urgence et ne devrait pas se déplacer. Le tableau 4.2 recense les points positifs et négatifs de cette configuration.

TABLEAU 4.2 – Avantages et désavantages de l'environnement virtuel affiché avec l'utilisation de la technologie

Avantages
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Permet de tester concrètement la réalité augmentée associée au planificateur de mission.</li> <li>2. Se rapproche grandement de l'utilisation future de la technologie pour un meilleur ressenti des utilisateurs.</li> </ol>
Désavantages
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nécessite la mise en place d'un affichage immersif et ne permet pas d'expériences en milieu réel.</li> <li>2. Non adapté pour le déplacement de l'utilisateur dans la situation.</li> </ol>

## Technologie, environnement réel et ajout d'informations en réalité augmentée

L'expérience serait ici à l'extérieur dans un environnement réel et la personne serait équipée du visiocasque RA. L'ensemble des critères «dangereux pour l'humain» à mettre en place serait virtualisé (drone, incendie) en hologramme de réalité augmentée. Cette configuration se base sur la minimisation de la virtualisation pour la simulation et permettrait de tester en environnement réel. Le tableau 4.3 recense les points positifs et négatifs de cette configuration.

TABLEAU 4.3 – Avantages et désavantages de la virtualisation complète de la logistique

<b>Avantages</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ne nécessite aucun affichage pour l'environnement virtuel et est donc très représentatif du système prévu.</li> <li>2. Expérimentation réelle d'une situation d'urgence sans danger.</li> </ol>
<b>Désavantages</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Demande une validation sur la stabilité du réseau HEAVEN en extérieur</li> <li>2. Risque de surcharge d'informations en réalité augmentée avec un faible champ de vision possible avec le visiocasque RA.</li> <li>3. Nécessite tout de même de virtualiser les informations des drones, car ceux-ci ne sont pas réels.</li> <li>4. Finalement peu représentatif du système prévu, car les informations pertinentes sont virtuelles.</li> </ol>

## Décision

Vis-à-vis des avantages et inconvénients de chacun, nous avons opté pour la seconde proposition «*Utilisation de la technologie prévue et affichage de l'environnement de simulation sur un écran immersif*». Dans une publication, Choi et al. [16] avaient développé leur propre système avec laser pour tester la réalité augmentée dans un environnement virtuel et nous avons procédé de façon similaire. Le reste de l'expérience est décrit dans l'article.

### 4.3.2 Adaptation de l'application pour l'expérience

En considérant la situation engendrée par la pandémie COVID-19, nous avons réadapté notre expérience pour tester notre technologie avec des personnes plus facilement disponibles que les pompiers du SIM. Nous avons donc choisi de faire une expérimentation à Polytechnique Montréal pour simuler une situation d'urgence. Nous avons dû revoir l'exercice et notamment simplifier les tests, car nous mettions en place un exercice difficile et stressant pour créer une situation d'urgence pour des personnes qui n'étaient pas habituées à ce genre de situation. L'exercice étant déjà complexe, il a fallu simplifier la technologie à tester pour que l'expérience se fasse dans de bonnes conditions et que le participant ne soit pas trop confus. Nous avons donc retiré le planificateur de mission, simplifié l'application RA et prédéfini la trajectoire de l'essaim. Nous avons également conçu une application pour une station de travail (PC) adaptée pour une interaction avec clavier et souris pour concevoir des outils similaires à la RA. Cela était nécessaire pour comparer l'efficacité entre les deux applications

et comprendre l'efficacité de la RA. Les informations complémentaires sont présentées dans l'article scientifique. Il aurait été nécessaire d'entrainer chaque participant avant l'évaluation pour les former en avance avec les technologies afin de renforcer la crédibilité des résultats. Cependant les conditions nous ont conduits à minimiser le temps d'expérience avec chaque participant ce qui nous a amenés à revoir la simulation de la situation d'urgence pour évaluer notre travail en une seule tentative avec chaque participant.

Nous avons revu notre simulateur pour adapter notre environnement sur la place Square Victoria de Montréal. Pour simplifier le développement et l'infrastructure, nous n'avons pas utilisé de technologie extérieure au simulateur pour construire notre expérience. Le réseau Heaven n'était pas utilisé et aucun drone virtuel n'était utilisé non plus. Nous avons cependant généré 4 drones au sein du simulateur et construit leur trajectoire de patrouille au niveau du bâtiment à l'aide d'outils créés initialement pour diriger l'essaim. Nous avons équipé les drones de caméra virtuelle pour récupérer une visualisation du bâtiment pendant leur mission. Le BGH a été construit par Humanitas Solutions et nous nous sommes chargés de modifier son intérieur pour rendre le bâtiment plus réel. Nous y avons également créé deux configurations qui contenaient chacun un foyer d'incendie et un ensemble de personnes virtuelles blessées (adultes et enfants). Pour chacune des missions, la configuration était différente et la figure 4.5 contient les deux configurations de l'expérience réalisée. Nous nous sommes servis de Unreal Engine 4.24 pour créer une interface PC sur Windows pour reprendre les outils de réalité augmentée et implémenter leurs fonctionnalités en 2D. Le simulateur contenait toutes les applications de l'expérience et il était seulement nécessaire de configurer quelques paramètres pour compiler l'application pour les trois composantes suivantes :

- Environnement virtuel contenant le BGH en flammes et les personnes en danger pour le vidéoprojecteur.
- Interface en réalité augmentée pour le Magic Leap 1 (RA).
- Interface logicielle pour Windows 10 (PC).

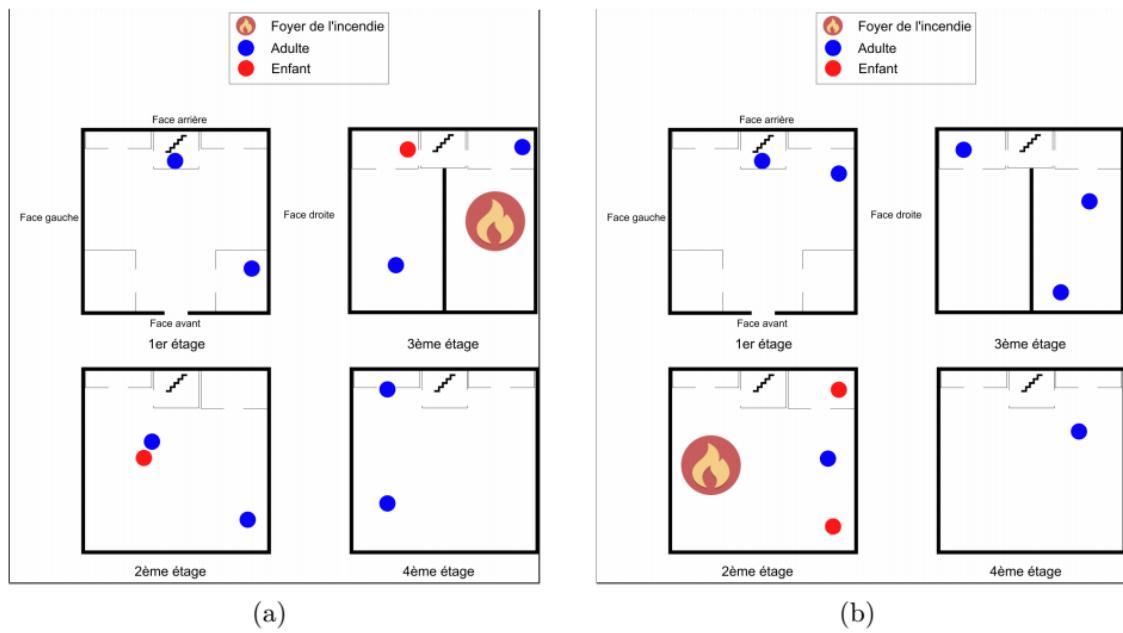


FIGURE 4.5 Emplacement des informations pour chaque mission pendant l'expérience (a) Mission 1 (b) Mission 2

## CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

### 5.1 Capacités du Hololens 1.0

Pendant toute la durée des recherches, nous avions prévu d'acquérir un nouveau visiocasque de réalité augmentée pour l'expérimentation. Le début du développement avait été fait en réalité virtuelle au départ afin également de tester également le simulateur. Le nouveau visiocasque ayant pris du retard à arriver. Nous avons décidé de faire les premières expérimentations avec le premier casque de Microsoft : Hololens 1.0.

#### Interactions

Les moyens d'interactions sont très limités avec ce visiocasque. Il est seulement possible d'utiliser un clicker ou un geste unique de la main pour effectuer une interaction avec le visiocasque. Pour cibler un élément, l'utilisateur doit regarder l'élément visé avec sa tête. Un seul autre geste est reconnu pour le casque pour revenir au menu principal du système.

#### Avantages

Ce casque a été utilisé dans nos recherches pour du prototypage seulement. Il était possible de diffuser en continu (“stream”) le contenu visuel directement sur le casque. Les calculs se faisant sur un ordinateur distant permettant de ne pas avoir de problèmes de ressources CPU et GPU pour tester notre interface en RA. Cela nous a permis de tester relativement tôt et facilement le rendu en réalité augmentée, car les différences visuelles entre la RA et RV sont quand même bien grandes.

#### Limitations

Beaucoup de limitations sont à noter sur ce visiocasque sorti en 2013 qui est le premier visiocasque commercial de réalité augmentée. Le champ de vision est de 34 degrés ce qui est trop faible pour l'utiliser dans un contexte de situation d'urgence. Beaucoup de personnes ont fait des remarques sur le champ de vision du Magic Leap 1 alors que celui-ci est déjà deux fois plus grand que celui du Hololens 1. De plus il n'était pas possible de compiler un exécutable avec le logiciel Unreal Engine 4 sur le Hololens 1.0 ce qui rendait une vraie expérimentation difficile. En ajoutant que les interactions étaient trop limitées, ce visiocasque aurait difficilement pu être testable dans ce genre de situation, car trop limité en termes

d'affichage et d'interactions.

## 5.2 Capacités du Magic Leap 1

Deuxième génération de visiocasque de réalité augmentée en concurrence avec le Hololens 2.0, le casque Magic Leap 1 a été le casque qui a été utilisé pour notre expérience finale avec plusieurs utilisateurs. De multiples développements ont été faits avec celui-ci et cette section recense les retours de son utilisation.

### Interactions

De multiples alternatives étaient possibles pour interagir. Voici une liste exhaustive de celles-ci :

- Contrôleur externe avec touchpad et trois boutons supplémentaires avec 6 degrés de liberté.
- Reconnaissance de plusieurs gestes de la main référés dans la revue de littérature à la figure 2.3
- Suivi des yeux (et non de la tête).
- Suivi précis de plusieurs parties de la main (doigts, paume et poignet).
- Reconnaissance de la voix.
- Par le biais d'une application mobile.
- Clavier à l'aide d'une connexion Bluetooth.

Nous ne nous sommes pas servis de toutes ces interactions, car nous voulions expérimenter l'utilisation unique des mains sans contrôleur pour interagir dynamique dans une interface en 3D autour de l'utilisateur. Nous avons utilisé le contrôleur pour un besoin de calibration, mais le visiocasque effectuait le suivi des doigts de l'utilisateur pour qu'il puisse appuyer sur les boutons de l'interface.

### Avantages

De façon générale, il était vraiment agréable de naviguer dans la réalité augmentée à l'aide de ce visiocasque. Le champ de vision d'environ 40 degrés ajoute un confort supplémentaire pour une application en réalité augmentée, car cela nous évite de voir les hologrammes coupés durant un petit mouvement de tête. De plus, le système d'exploitation Lumin OS est personnalisable et est dérivé de composants open source provenant de Linux et le projet open source Android. Ceci étant compatible avec Unreal Engine 4.24 à l'aide d'un kit de développement

logiciel, il était possible soit de diffuser en continu («stream») sur le visiocasque ou bien de compiler une application pour le système d'exploitation. Le casque est composé en deux parties dont la partie ordinateur se place dans la poche afin de réduire la taille et le poids du visiocasque ce qui le rendait léger. Il était également possible de faire du contrôle à distance pour gérer le visiocasque permettant de garder une distance de 2 mètres avec l'utilisateur pendant l'expérience en temps de pandémie.

## **Limitations**

En se basant sur les retours de participant vis-à-vis de l'expérience et de son utilisation pour nos recherches, quelques limitations sont notables pour ce visiocasque. Tout d'abord le visiocasque n'est pas adapté pour les personnes avec correction de la vue, car il n'est pas possible de porter des lunettes en même temps. Il y a une personnalisation de verre correcteur virtuel dans le casque, mais pour l'avoir essayé, cela n'a pas donné de résultats concluants. Nous avons donc dû refuser l'expérience à certaines personnes ayant besoin d'une correction sans verre de contact par contrainte de ne pas profiter de l'expérience à cause d'une impossibilité de voir nettement les hologrammes, mais une solution externe est en cours de commercialisation pour ajouter des verres correcteurs en ajout sur le visiocasque à un coût supplémentaire. De plus, l'attache du casque pour tenir sur la tête n'était pas adaptée pour les personnes avec une petite tête, plusieurs remarques ont été faites après l'expérience. Le câble qui relie également la partie ordinateur et la partie visiocasque était relativement gênant dû au fait que celui-ci s'entremêlait avec les bras de l'utilisateur lorsque celui-ci voulait interagir avec le système. Le champ de vision s'est bien amélioré depuis quelques années, mais il semblait encore trop petit selon les personnes qui l'ont utilisé pour l'expérience ce qui reste l'une des plus grandes limitations des visiocasques. Aucun test n'a été fait avec ce visiocasque à l'extérieur.

### **5.3 Bonnes pratiques en réalité augmentée**

Lors du développement de l'expérimentation, plusieurs points sont ressortis soit par des personnes qui avaient testé au préalable l'expérience ou par nous-mêmes qui avons développé l'application.

Un premier retour concerne le placement des widgets autour de l'utilisateur. Lorsque l'on souhaite placer plusieurs outils 3D différents autour de l'utilisateur, il était très perturbant que les outils le suivent durant la mission dû au faible champ de vision. Il était donc préférable que les outils soient placés en une place unique quitte à replacer l'outil sur la demande de

l'utilisateur, mais pas de le garder en mouvement pour éviter des interactions non voulues avec les outils.

Un deuxième concerne la comparaison des distances des hologrammes entre le repère virtuel et le monde réel. Pour tester l'expérimentation, nos recherches nous ont poussés à travailler d'abord avec un écran de télévision pour afficher le monde virtuel. Pour calibrer la réalité augmentée sur l'écran, il a fallu adapter la distance virtuelle dans le repère interne du casque. Le problème est que la distance réelle entre l'utilisateur et l'écran est beaucoup plus faible que la distance virtuelle entre le BGH et le visiocasque. Cela créait un problème à l'utilisateur, car si ses yeux regardaient l'écran, la distance réelle des hologrammes était beaucoup plus grande et la personne les voyait en doubles. L'utilisateur devait concentrer son attention soit sur l'écran ou soit sur la réalité augmentée, mais difficilement les deux en même temps. Heureusement l'expérimentation réelle sur une projection sur un écran géant était beaucoup plus grande et la distance réelle et virtuelle était presque semblable.

En optant pour l'interaction avec les mains sans moyen additionnel de fournir un retour haptique, il était primordial d'ajouter un retour sonore. Le retour sonore était accompagné d'une animation permettant à l'utilisateur d'être conscient des actions qu'il engendrait.

Le champ de vision étant différent selon la RA et la RV et les différents types de casques, il a fallu revoir les tailles de chaque outil selon le type de visiocasque RA ou RV.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION

### 6.1 Synthèse des travaux

Nos recherches consistaient en l'analyse d'une situation d'urgence et de travailler sur une solution en réalité augmentée avec un système autonome composé de drones pour améliorer les résolutions de situations critique.

Nous avons commencé en parcourant la littérature scientifique pour comprendre les aspects clefs d'une situation d'urgence, comprendre ce qui semble difficile pour l'humain pour résoudre ces missions et également analyser les avancées technologiques sur la réalité augmentée et la téléopération. Le milieu d'urgence étant assez large, nous avons dirigé nos recherches avec le SIM (Service de sécurité incendie de Montréal) afin de comprendre leur mission et leurs potentiels besoins. Nous en avons émis plusieurs hypothèses ( $H_{a1}, H_{a2}, H_{a3}, H_{a4}$ ) afin de savoir si la réalité augmentée était utile pour assister l'humain et améliorer sa compréhension dans ce genre de situation. Pour valider ou non ces hypothèses, nous avons listé dans la section 2.12.3 un ensemble de 7 objectifs spécifiques à effectuer. Nous avons ensuite travaillé conjointement avec le partenaire industriel Humanitas Solutions pour comprendre leur technologie et mettre un système conjoint entre visiocasque de réalité augmentée et planificateur de mission pour contrôler un essaim de drones. Nous avons pu tester notre travail principalement dans un environnement virtuel, mais aussi en conditions réelles. L'ensemble des objectifs spécifiques ont été accomplis (O.1, O.2, O.3, O.4, O.5, O.6, O.7), car nous avons pu réaliser une application fonctionnelle avec un visiocasque de RA et un planificateur de mission pour commander le système. Les outils disponibles dans le système ont été faits dans le but d'améliorer la connaissance situationnelle de l'utilisateur pour comprendre plus rapidement la situation dans laquelle il se trouve. La seule modification est l'objectif O.6 correspondant au scénario de test et l'application à tester due aux changements de participants pour l'expérience. Il était initialement prévu de tester notre application avec des pompiers du SIM mais dû au contexte actuel de la pandémie du COVID-19, nous avons dû réadapter notre expérience avec des personnes sans connaissances du milieu de l'urgence. Nous avons soumis les participants à une épreuve stressante et difficile avec notre application avec le visiocasque RA Magic Leap 1. Nous avons également demandé au participant de faire le même exercice avec un ordinateur pour comparer l'efficacité entre les deux technologies.

En se basant sur les critères de validation que nous avons établis et les résultats des participants, nous pouvons valider les hypothèses spécifiques énoncées avec cependant quelques remarques importantes. Le visiocasque RA s'est retrouvé moins performant que l'ordinateur

de façon générale, cependant la différence entre les deux systèmes est faible. En sachant que l'utilisation du visiocasque était une première expérimentation pour tous les participants, il est légitime de penser qu'avec plus de pratique, le visiocasque pourrait égaler voire être plus performant qu'un ordinateur pour une situation d'urgence. La réalité augmentée par l'utilisation d'un visiocasque RA se commercialise de plus en plus au niveau des entreprises et des grands groupes aujourd'hui dans le but de faciliter la compréhension de l'information. Nous pensons que nos recherches pourront aider à perfectionner les prochains travaux dans le contexte de la simulation des situations d'urgence et appuyer l'importance de la réalité augmentée dans ces situations.

## 6.2 Améliorations futures

Pour améliorer le système présent, il serait intéressant tout d'abord de poursuivre une autre approche d'expérimentation et d'essayer la technologie en extérieur avec un essaim de vrais drones qui pourrait suivre les commandes de la technologie. Connaître l'approche du système testé en environnement extérieur permettrait de prendre conscience d'importants facteurs avec de vrais drones et ainsi poursuivre un développement plus poussé de l'interface RA pour améliorer la connaissance situationnelle de l'utilisateur. Cela permettrait de savoir à quel point il est facile de contrôler un essaim de drones, car nous n'avons pas pu tester ce point en condition réelle avec des personnes.

L'autre amélioration à nos recherches serait de tester avec des personnes fortement liées aux conditions de l'urgence. Le fait de tester notre technologie avec des personnes qui vivent chaque jour des situations critiques aurait généré des retours très intéressants sur l'utilité et l'impact de cette technologie pour les situations futures et aurait permis d'appuyer l'acceptation de cette technologie dans ce milieu.

Il aurait été également pertinent de faire un comparatif avec la dernière technologie de visiocasque RA de Microsoft : le Hololens 2.0. Le casque possédant des moyens d'interactions et une stabilité égale voire supérieure au Magic Leap 1, il serait pertinent lors d'un test avec des acteurs de l'urgence de leur proposer l'outil le plus stable pour éviter un rejet de la RA à cause des lacunes actuelles des visiocasques.

## RÉFÉRENCES

- [1] Tracking | Leap Motion Controller | Ultraleap. URL <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>.
- [2] Antti Ajanki, Mark Billinghurst, Hannes Gamper, Toni Järvenpää, Melih Kandemir, Samuel Kaski, Markus Koskela, Mikko Kurimo, Jorma Laaksonen, Kai Puolamäki, Teemu Ruokolainen, and Timo Tossavainen. An augmented reality interface to contextual information. *Virtual Reality*, 15(2-3) :161–173, June 2011. ISSN 1359-4338, 1434-9957. doi : 10.1007/s10055-010-0183-5. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10055-010-0183-5>.
- [3] Allaboutux. Emocards UX, 2019. URL <https://www.allaboutux.org/emocards>. Date : 21/06/2019.
- [4] Apple. Design User interface, 2019. URL <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/ios/overview/themes/>. Date : 2019-06-13.
- [5] Chris Argenta, Anne Murphy, Jeremy Hinton, James Cook, Todd Sherrill, and Steve Snarski. Graphical user interface concepts for tactical augmented reality. In Peter L. Marasco and Paul R. Havig, editors, *Head- and Helmet-Mounted Displays XV : Design and Applications*, volume Head- and Helmet-Mounted Displays XV : Design and Applications, page 76880I, Orlando, Florida, April 2010. doi : 10.1117/12.849462. URL <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.849462>.
- [6] Yulyani Arifin, Thomas Galih Sastria, and Edo Barlian. User Experience Metric for Augmented Reality Application : A Review. *Procedia Computer Science*, 135 :648–656, January 2018. ISSN 1877-0509. doi : 10.1016/j.procs.2018.08.221. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091831514X>.
- [7] Adham Atyabi, Somaiyeh MahmoudZadeh, and Samia Nefti-Meziani. Current advancements on autonomous mission planning and management systems : An AUV and UAV perspective. *Annual Reviews in Control*, 46 :196–215, 2018. ISSN 13675788. doi : 10.1016/j.arcontrol.2018.07.002. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1367578818300257>.
- [8] Ronald T. Azuma. A Survey of Augmented Reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4) :355–385, August 1997. ISSN 1054-7460. doi : 10.1162/pres.1997.6.4.355. URL <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>.
- [9] Thomas Bertrand, Laurent Moccozet, and Jean-Henry Morin. Augmented Human-Workplace Interaction : Revisiting Email. In *Conference : Information Visualisation*,

- pages 1–8, At Salerno, Italy, July 2018. ISBN 78-1-5386-7202-0. doi : 10.1109/iV.2018.00042.
- [10] F. Brizzi, L. Peppoloni, A. Graziano, E. Di Stefano, C.A. Avizzano, and E. Ruffaldi. Effects of Augmented Reality on the Performance of Teleoperated Industrial Assembly Tasks in a Robotic Embodiment. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 48(2) :197 – 206, 2018. ISSN 2168-2291. doi : 10.1109/THMS.2017.2782490. URL <http://dx.doi.org/10.1109/THMS.2017.2782490>.
- [11] B. L. Brumitt and A. Stentz. Dynamic mission planning for multiple mobile robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2396–2401 vol.3, April 1996. doi : 10.1109/ROBOT.1996.506522.
- [12] Zhihao Cai and Ruyi Yan. Multi-level optimization mission planning and control methods for unmanned aerial vehicle. In *2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, FPM 2011, August 17, 2011 - August 20, 2011*, Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, FPM 2011, pages 306–310. IEEE Computer Society, 2011. doi : 10.1109/FPM.2011.6045778.
- [13] Daniel Carrillo-Zapata, Emma Milner, Julian Hird, Georgios Tzoumas, Paul J. Vardanega, Mahesh Sooriyabandara, Manuel Giuliani, Alan F. T. Winfield, and Sabine Hauert. Mutual Shaping in Swarm Robotics : User Studies in Fire and Rescue, Storage Organization, and Bridge Inspection. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 2020. ISSN 2296-9144. doi : 10.3389/frobt.2020.00053. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.00053/full>. Publisher : Frontiers.
- [14] Meghan Chandarana, Erica L. Meszaros, Anna Trujillo, and B. Danette Allen. Challenges of Using Gestures in Multimodal HMI for Unmanned Mission Planning. In Jessie Chen, editor, *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*, volume 595, pages 175–182. Springer International Publishing, Cham, 2018. ISBN 978-3-319-60383-4 978-3-319-60384-1. doi : 10.1007/978-3-319-60384-1\_17. URL [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-60384-1\\_17](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-60384-1_17).
- [15] Keshav Chintamani, Alex Cao, R. Darin Ellis, Chin-An Tan, and Abhilash K. Pandya. Systematic tele-operation with augmented reality path planned navigation cues in cluttered environments. In *53rd Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 2009, HFES 2009, October 19, 2009 - October 23, 2009*, volume 1 of *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, pages 81–85. Human Factors an Ergonomics Society Inc., 2009. ISBN 10711813. doi : 10.1518/107118109X12524441078941.
- [16] Min-Kook Choi, Jin-Hee Lee, Heechul Jung, Iman R. Tayibnapis, and Soon Kown. Simulation framework for improved UI/UX of AR-HUD display. In *2018 IEEE International*

*Conference on Consumer Electronics, ICCE 2018, January 12, 2018 - January 14, 2018, volume 2018-January of 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2018, pages 1–4, Las Vegas, NV, United states, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi : 10.1109/ICCE.2018.8326307.*

- [17] Rory M.S. Clifford, Humayun Khan, Simon Hoermann, Mark Billinghurst, and Robert W. Lindeman. Development of a multi-sensory virtual reality training simulator for airborne firefighters supervising aerial wildfire suppression. In *2018 IEEE Workshop on Augmented and Virtual Realities for Good, VAR4Good 2018, March 18, 2018*, 2018 IEEE Workshop on Augmented and Virtual Realities for Good, VAR4Good 2018, pages 1–5. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. doi : 10.1109/VAR4GOOD.2018.8576892.
- [18] Eve-Anne Conan. Projet supervisé : Intervenir en situation d'urgence : L'écosystème d'Humanitas Solutions en support aux pompiers de Montréal., October 2019. HEC Montréal, Québec, Canada.
- [19] Leandro R. Costa, Daniel Aloise, Luca G. Gianoli, and Andrea Lodi. The Covering-Assignment Problem for Swarm-powered Ad-hoc Clouds : A Distributed 3D Mapping Use-case. *Accepted by IEEE Transactions on IoTs.*
- [20] M. Cousins, Chenguang Yang, Junshen Chen, Wei He, and Zhaojie Ju. Development of a mixed reality based interface for human robot interaction. In *2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC). Proceedings*, volume vol.1, pages 27 – 34, Piscataway, NJ, USA, 2017. doi : 10.1109/ICMLC.2017.8107738.
- [21] Carolina Cruz-Neira, Daniel Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality : The Design and Implementation of the CAVE. In *Proceedings of the 20st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH*, volume 27, pages 135–142, September 1993. doi : 10.1145/166117.166134.
- [22] Aditya Das, Patrik Kol, Cody Lundberg, Kris Doelling, Hakki Erhan Sevil, and Frank Lewis. A Rapid Situational Awareness Development Framework for Heterogeneous Manned-Unmanned Teams. In *NAECON 2018 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, pages 417–424, July 2018. doi : 10.1109/NAECON.2018.8556769. ISSN : 2379-2027.
- [23] Aditya N. Das, Kris Doelling, Cody Lundberg, Hakki Erhan Sevil, and Frank Lewis. A Mixed reality based hybrid swarm control architecture for manned-unmanned teaming (MUM-T). In *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2017, November 3, 2017 - November 9, 2017*, volume 14

- of *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, page ASME. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2017. doi : 10.1115/IMECE2017-72076.
- [24] Frauke Driewer, Markus Sauer, and Klaus Schilling. Mixed reality for teleoperation of mobile robots in search and rescue scenarios. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(3) : 267–272, 2006. ISSN 14746670. doi : 10.3182/20060517-3-FR-2903.00148. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667015358687>.
- [25] D. G. Duru, A. Deniz Duru, D. E. Barkana, O. Sanli, and M. Ozkan. Assessment of surgeon’s stress level and alertness using EEG during laparoscopic simple nephrectomy. In *2013 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, pages 452–455, November 2013. doi : 10.1109/NER.2013.6695969.
- [26] M. R. Endsley. Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference*, pages 789–795 vol.3, May 1988. doi : 10.1109/NAECON.1988.195097.
- [27] Mica R. Endsley, Betty Bolte, Debra G. Jones, Betty Bolte, and Debra G. Jones. *Designing for Situation Awareness : An Approach to User-Centered Design*. CRC Press, July 2003. ISBN 978-1-135-72949-3. doi : 10.1201/9780203485088. URL <https://www.taylorfrancis.com/books/9781135729493>.
- [28] Jared A. Frank, Matthew Moorhead, and Vikram Kapila. Realizing mixed-reality environments with tablets for intuitive human-robot collaboration for object manipulation tasks. In *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016, August 26, 2016 - August 31, 2016*, 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016, pages 302–307. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. doi : 10.1109/ROMAN.2016.7745146.
- [29] Nathan Gaydhani. Project Using the Microsoft HoloLens outdoors with a visor. | Digital Reality Consulting, 2018. URL <http://digitalreality.guru/2016/12/project-using-the-microsoft-hololens-outdoors-with-a-visor/>.
- [30] Ramy Hammady, Minhua Ma, and Anna Powell. User Experience of Markerless Augmented Reality Applications in Cultural Heritage Museums : ‘MuseumEye’ as a Case Study. In Lucio Tommaso De Paolis and Patrick Bourdot, editors, *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, Lecture Notes in Computer Science, pages 349–369. Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-95282-6.

- [31] Marc Hassenzahl and Noam Tractinsky. User experience - a research agenda. *Behaviour & Information Technology*, 25(2) :91–97, March 2006. ISSN 0144-929X. doi : 10.1080/01449290500330331.
- [32] Roman Herrmann and Ludger Schmidt. Design and Evaluation of a Natural User Interface for Piloting an Unmanned Aerial Vehicle. *i-com*, 17(1) :15–24, 2018. ISSN 1618-162X. doi : 10.1515/icom-2018-0001. URL <https://www.degruyter.com/view/j/icom.2018.17.issue-1/icom-2018-0001/icom-2018-0001.xml>.
- [33] Michelle Hester, Steffen Werner, Cassie Greenwald, and Jessica Gunning. Exploring the Effects of Text Length and Difficulty on RSVP Reading. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1) :1294–1298, September 2016. ISSN 1541-9312. doi : 10.1177/1541931213601300.
- [34] B. Hookway. *Interface*. Cultural studies. MIT Press, 2014. ISBN 978-0-262-52550-3. URL [https://books.google.ca/books?id=BQM\\_AwAAQBAJ](https://books.google.ca/books?id=BQM_AwAAQBAJ).
- [35] Jen-Hsuan Hsiao, Yu-Heng Deng, Tsung-Ying Pao, Hsin-Rung Chou, and Jen-Yuan (James) Chang. Design of a Wireless 3D Hand Motion Tracking and Gesture Recognition Glove for Virtual Reality Applications. In *ASME 2017 Conference on Information Storage and Processing Systems*, San Francisco, California, USA, August 2017. ASME. ISBN 978-0-7918-5810-3. doi : 10.1115/ISPS2017-5450.
- [36] F. Karydes and D. Saussié. Distributed algorithm for the navigation of a swarm of nano-quadrotors in cluttered environments\*. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 100–110, September 2020. doi : 10.1109/ICUAS48674.2020.9214055. ISSN : 2575-7296.
- [37] Goulven Kermarec. Développement d'un système en réalité augmentée d'assistance aux opérateurs de machinerie lourde dans une cour à bois. Master's thesis, Polytechnique Montréal, May 2019. URL <https://publications.polymtl.ca/3873/>.
- [38] Kai Klinker, Lisa Berkemeier, Benedikt Zobel, Hanna Wüller, Veronika Huck, Manuel Wiesche, Hartmut Remmers, Oliver Thomas, and Helmut Krcmar. Structure for innovations : A use case taxonomy for smart glasses in service processes. *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik*, page 12, 2018.
- [39] A. Kolling, P. Walker, N. Chakraborty, K. Sycara, and M. Lewis. Human Interaction With Robot Swarms : A Survey. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1) : 9–26, February 2016. ISSN 2168-2305. doi : 10.1109/THMS.2015.2480801. Conference Name : IEEE Transactions on Human-Machine Systems.
- [40] Kai Kruckel, Florian Nolden, Alexander Ferrein, and Ingrid Scholl. Intuitive visual teleoperation for UGVs using free-look augmented reality displays. In *2015 IEEE In-*

- ternational Conference on Robotics and Automation, ICRA 2015, May 26, 2015 - May 30, 2015*, volume 2015-June of *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4412–4417. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. ISBN 10504729. doi : 10.1109/ICRA.2015.7139809.
- [41] Sebastian Lang, Mohammed Saif Sheikh Dastagir Kota, David Weigert, and Fabian Behrendt. Mixed reality in production and logistics : Discussing the application potentials of Microsoft HoloLensTM. *Procedia Computer Science*, 149 :118–129, January 2019. ISSN 1877-0509. doi : 10.1016/j.procs.2019.01.115. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091930122X>.
- [42] Effie Lai-Chong Law, Virpi Roto, Marc Hassenzahl, Arnold P.O.S. Vermeeren, and Joke Kort. Understanding, Scoping and Defining User Experience : A Survey Approach. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pages 719–728, New York, NY, USA, 2009. ACM. ISBN 978-1-60558-246-7. doi : 10.1145/1518701.1518813. event-place : Boston, MA, USA.
- [43] Magic Leap. Magic Leap One : Creator Edition, 2019. URL <https://www.magicleap.com/magic-leap-one>.
- [44] E. Lee and Y. Kwon. The effect of Tactical Situation Display on attack helicopter pilot's workload. In *2014 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, volume 02, pages 680–684, September 2014. ISBN 978-989-758-062-8.
- [45] Microsoft. Conception et interface utilisateur pour UWP - Windows UWP applications, 2019. URL <https://docs.microsoft.com/fr-fr/windows/uwp/design/>. Date : 2019-05-20.
- [46] Microsoft. HoloLens | Mixed Reality Technology for Business, 2019. URL <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>. Date : 2019-05-16.
- [47] Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, and Fumio Kishino. Augmented reality : a class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351, pages 282–293. International Society for Optics and Photonics, December 1995. doi : 10.1117/12.197321. URL <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/2351/0000/Augmented-reality--a-class-of-displays-on-the-reality/10.1117/12.197321.short>.
- [48] NASA. NASA-TLX , <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>, 2019. URL <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>.

- [49] Norzailawati Mohd Noor, Alias Abdullah, and Mazlan Hashim. Remote sensing UAV/drones and its applications for urban areas : a review. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 169 :012003, July 2018. ISSN 1755-1315. doi : 10.1088/1755-1315/169/1/012003.
- [50] J. Park, P. A. Chou, and J. Hwang. Volumetric Media Streaming for Augmented Reality. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, December 2018. doi : 10.1109/GLOCOM.2018.8647537.
- [51] Young Soo Park, Jia Luo, Pawel Dworzanski, Joohee Kim, and Byung Seon Choi. Augmented reality system for remote operation. In *10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, NPIC and HMIT 2017, June 11, 2017 - June 15, 2017*, volume 2 of *10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, NPIC and HMIT 2017*, pages 742–751. American Nuclear Society, 2017.
- [52] J. Patel and C. Pincioli. Improving Human Performance Using Mixed Granularity of Control in Multi-Human Multi-Robot Interaction. In *2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 1135–1142, August 2020. doi : 10.1109/RO-MAN47096.2020.9223553. ISSN : 1944-9437.
- [53] J. Patel, Y. Xu, and C. Pincioli. Mixed-Granularity Human-Swarm Interaction. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1059–1065, May 2019. doi : 10.1109/ICRA.2019.8793261. ISSN : 2577-087X.
- [54] Danny Plass-Oude Bos. EEG-based Emotion Recognition. *The Influence of Visual and Auditory Stimuli*, January 2006.
- [55] J. J. Ruiz, A. Viguria, J. R. Martinez-de Dios, and A. Ollero. Immersive displays for building spatial knowledge in multi-UAV operations. In *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 1043–1048, June 2015. doi : 10.1109/ICUAS.2015.7152395.
- [56] Hiroshi Sasaki, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe, and Kunihiro Chihara. Augmented Reality Based Input Interface for Wearable Computers. In G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, and Jean-Claude Heudin, editors, *Virtual Worlds*, volume 1834, pages 294–302. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2000. ISBN 978-3-540-67707-9 978-3-540-45016-0. doi : 10.1007/3-540-45016-5\_27. URL [http://link.springer.com/10.1007/3-540-45016-5\\_27](http://link.springer.com/10.1007/3-540-45016-5_27).
- [57] Daniel Sullivan, Eric Arthur, and Przemyslaw Gardias. Augmented Reality as a Means of Improving Efficiency and Immersion of Human-Swarm Interaction. *Major Qualifying*

- Projects (All Years)*, May 2020. URL <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/7382>.
- [58] Stefan Trzcielinski, Waldemar Karwowski, and Waldemar Karwowski. *Advances in Ergonomics in Manufacturing*. CRC Press, July 2012. ISBN 978-0-429-10760-3. doi : 10.1201/b12322. URL <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429107603>.
- [59] Markku Turunen, Jaakko Hakulinen, Aleksi Melto, Tomi Heimonen, Tuuli Keskinen, and Juho Hella. SUXES - User experience evaluation method for spoken and multimodal interaction. In *INTERSPEECH 2009, 10th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, pages 2567–2570, Brighton, United Kingdom, January 2009.
- [60] Company UID. AttrakDiff Method, 2019. URL <http://attrakdiff.de/index-en.html>. Date : 21/06/2019.
- [61] Rick Van Krevelen and Ronald Poelman. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality (ISSN 1081-1451)*, 9 :1, June 2010. doi : 10.1.1.454.8190.
- [62] V. Villani, B. Capelli, and L. Sabattini. Use of Virtual Reality for the Evaluation of Human-Robot Interaction Systems in Complex Scenarios. In *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 422–427, August 2018. doi : 10.1109/ROMAN.2018.8525738.
- [63] R. Wang, H. Lu, J. Xiao, Y. Li, and Q. Qiu. The Design of an Augmented Reality System for Urban Search and Rescue. In *2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, pages 267–272, August 2018. doi : 10.1109/IISR.2018.8535823.
- [64] Robert Y. Wang and Jovan Popović. Real-time hand-tracking with a color glove. *ACM Transactions on Graphics*, 28(3) :1, July 2009. ISSN 07300301. doi : 10.1145/1531326.1531369. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1531326.1531369>.
- [65] Zhenhui Yuan, Jie Jin, Lingling Sun, Kwan-Wu Chin, and Gabriel-Miro Muntean. Ultra-Reliable IoT Communications with UAVs : A Swarm Use Case. *IEEE Communications Magazine*, 56(12) :90–96, December 2018. ISSN 1558-1896. doi : 10.1109/MCOM.2018.1800161. Conference Name : IEEE Communications Magazine.
- [66] L. Zahud. Augmented reality user interface for reconnaissance robotic missions. In *16th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN, August 26, 2007 - August 29, 2007*, Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pages 974–979. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007. doi : 10.1109/ROMAN.2007.4415224.

## ANNEXE A LISTE DES OUTILS DE RÉALITÉ AUGMENTÉE IMPLÉMENTÉS

### A.1 Édition générale des outils et menu principal

#### A.1.1 Description générale

Outil correspondant au menu général de l'interface. Il contient diverses informations sur les missions en cours et les principales options de paramétrage. Ce menu prend forme en 2D et 3D. Elle est disposée au niveau de la ceinture de l'utilisateur. Cette dernière s'affiche lorsque l'utilisateur baisse la tête et son affichage peut être réduit si besoin. Un visuel se trouve à la figure A.1.

#### A.1.2 Fonctionnalités

Ce menu permet de gérer la majorité des outils de réalité augmentée de deux manières différentes :

- Réduire l'affichage de l'outil dans un petit bloc pour augmenter la visibilité réelle.
- Déplacer l'outil selon le besoin utilisateur pour le placer là où il le souhaite dans son interface dans un espace de 180°.

Il contient les informations suivantes, certaines informations ont besoin d'une connectivité internet pour être fonctionnelles :

- La date et l'heure de la journée (EDT)
- La météo
- Informations de la mission en cours et son avancement en pourcentage
- La connectivité avec le planificateur de mission

Il contient plusieurs boutons permettant la liste d'actions suivante :

- La possibilité de sélectionner les drones par le regard (raycast).
- Afficher l'outil «Liste des drones».
- Désactiver l'ensemble des outils de réalité augmentée sauf le menu principal.
- Permettre de créer des missions.
- Afficher un modèle interactif en trois dimensions.
- Activer la messagerie.

### A.1.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

Ce menu est propre à l'interface du visiocasque de réalité augmentée. Le seul lien correspond à l'icône indiquant une connectivité planificatrice et visiocasque.



FIGURE A.1 Menu principal de l'utilisateur

## A.2 Localisation GPS planificateur de mission - visiocasque

### A.2.1 Description générale

Ceci est une fonctionnalité plutôt qu'un outil en lui-même. Il permet de géolocaliser le visiocasque dans le monde réel ou bien de le localiser dans un environnement de simulation.

### A.2.2 Fonctionnalités

Dans un environnement de simulation, cela téléporte l'utilisateur dans un emplacement de la simulation grâce à des coordonnées GPS réelles. En terrain réel, le visiocasque se servira du GPS du planificateur pour se situer.

Au démarrage de la synchronisation avec le planificateur de mission. Ce widget fixe la position de l'utilisateur dans son repère privé (0,0,0) avec comme repère global la première coordonnée GPS envoyée par le planificateur.

### A.2.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

Dans le simulateur, le planificateur fournit l'endroit où l'utilisateur doit se téléporter. En terrain réel, le planificateur fournit son emplacement grâce à son GPS pour situer le visiocasque, car il se trouvera au même endroit que le planificateur.

## A.3 Modèle en 3D – visualisations et annotations

### A.3.1 Description générale

L'outil permet de visualiser des objets en trois dimensions en hologramme par le visiocasque. Ceci peut être n'importe quel objet en trois dimensions qui se trouvent sur le planificateur ou bien le modèle en trois dimensions d'un bâtiment ou place en question dans le cadre de la situation d'urgence (déjà modélisé en trois dimensions à l'avance). Le principe est d'observer l'objet 3D dans toutes les orientations possibles et d'annoter des informations si le besoin en est ressenti. Un visuel se trouve à la figure A.2.

### A.3.2 Fonctionnalités

En premier lieu, on peut charger depuis le planificateur de mission des objets en trois dimensions. On peut ensuite les observer en le manipulant avec les mains pour observer depuis plusieurs angles. L'objet s'affiche devant l'utilisateur et il peut le placer où il le souhaite grâce à l'édition générale des outils. Un visuel se trouve à la figure A.2.

### A.3.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

C'est le planificateur qui fournit depuis le réseau les objets en 3D ou qui les télécharge depuis internet si besoin est.



FIGURE A.2 Premier modèle d'un objet 3D interactif

## A.4 Placement des points de passage pour les drones

### A.4.1 Description générale

Le widget permet de créer des missions ou d'ajuster des préparations de mission du planificateur à l'aide du visiocasque pour l'essaim. Ce widget indique en réalité augmentée des points de passage pour en faire une trajectoire à se répartir entre les drones. Un visuel se trouve à la figure A.3.

### A.4.2 Fonctionnalités

Ce widget se sert du pointage dans un environnement 3D pour créer une série de points placés dans un espace en trois dimensions. Le regroupement de ces points dans un ordre défini crée une mission qui peut être effectuée par l'essaim de drones.

### A.4.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

L'ensemble des coordonnées des points sous format GPS seront envoyées au planificateur qui crée des missions pour les retransmettre au visiocasque et aux drones.



FIGURE A.3 Création d'un chemin pour les drones et la distance du dernier point vis-à-vis de l'utilisateur

## A.5 Notifications

### A.5.1 Description générale

Outil avertisseur tous les types d'évènements qui surviennent à l'utilisateur. Un visuel se trouve à la figure A.4.

### A.5.2 Fonctionnalités

Ce widget affiche des messages en haut à droite de l'affichage utilisateur. Il alerte pour les évènements suivants :

- Nouveau drone détecté
- Connexion avec le planificateur
- Déconnexion du planificateur
- Déplacement (téléportation) par action du planificateur
- Détection d'un nouveau pair (onion)

Les alertes seront classées sous 3 catégories :

- Urgente / Erreur (Rouge)
- Avertissement / Important (Jaune)
- Information (Blanc)

### A.5.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

Les alertes sont détectées par le planificateur et transmises au visiocasque.



FIGURE A.4 Exemple de plusieurs types de notifications

## A.6 Sélection de drones

### A.6.1 Description générale

La sélection de drones est un moyen de choisir un drone spécifique d'une quelconque manière. Cet outil présente les différentes possibilités de sélectionner un drone en fonctionnement avec le visiocasque ou le planificateur.

### A.6.2 Fonctionnalités

Plusieurs moyens sont possibles pour sélectionner le drone.

- Par le regard, on peut sélectionner le drone en ajustant la tête pour que le drone en question se retrouve en face de l'utilisateur.
- En utilisant l'outil «Liste des drones» par appui d'un bouton de drone.

La sélection de drones permet de lancer l'outil en section A.8.

### A.6.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

Si une sélection s'effectue sur le planificateur, elle se fait également sur le visiocasque. La sélection d'un drone par le visiocasque est transmise au planificateur.

## A.7 (WebApp - non implémenté) Vision temps réel de la vision visiocasque

### A.7.1 Description générale

Interface web complètement séparée de système (planificateur + visiocasque). Elle permet d'afficher en temps réel l'affichage du visiocasque depuis l'extérieur avec une fenêtre de dialogue ("chat") écrit ou/et vocal relié à l'outil messagerie pour permettre une assistance supplémentaire par une personne extérieure.

### A.7.2 Fonctionnalités

Ce widget serait accessible depuis un lien URL. Il contiendrait un flux vidéo en temps réel du visiocasque avec l'environnement réel et les informations augmentées. Une fenêtre de dialogue ("chat") serait accessible pour pouvoir entamer une conversation avec l'utilisateur dans l'objectif de l'assister si besoin.

## A.8 Liste des drones

### A.8.1 Description générale

Outil listant l'ensemble des drones fonctionnels à l'utilisateur. Il permet de sélectionner un drone. Un visuel se trouve à la figure A.5.

### A.8.2 Fonctionnalités

Ce widget liste l'ensemble des drones dans une liste déroulante. Cette liste contient deux boutons supplémentaires qui permettent de dérouler la liste vers le haut et vers le bas si trop de drones sont présents. Un indicateur indique quand il y a des drones non affichés dans la liste. Chaque drone est représenté par un bouton avec sa couleur et son nom. Appuyer sur un bouton entraîne la sélection d'un drone.

### A.8.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

La sélection d'un drone est transmise au planificateur.

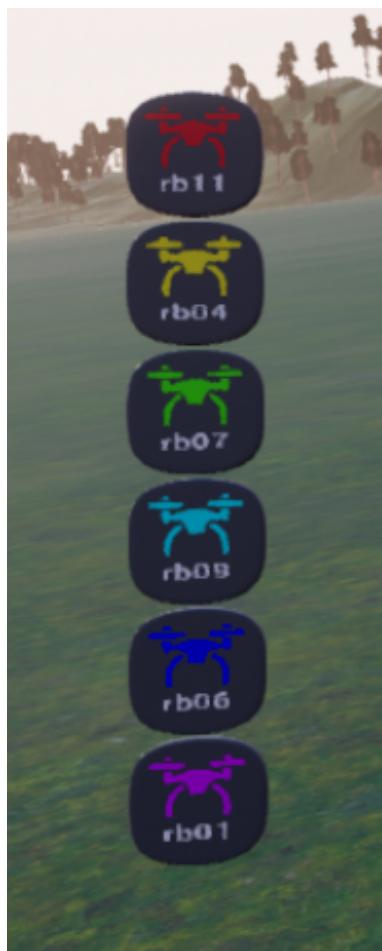


FIGURE A.5 Widget liste des drones

## A.9 Information provenant des drones

### A.9.1 Description générale

Outil permettant de visualiser l'ensemble des informations fournies par les drones en fonctionnement. Cet outil est visible lorsqu'une sélection d'un drone a été effectuée. Des visuels se trouvent à la figure A.6 et à la figure A.7.

### A.9.2 Fonctionnalités

Il s'agit d'un panneau d'affichage en deux dimensions qui est relié au drone sélectionné. Il contient les informations suivantes :

- Couleur associée au drone
- Nom
- Niveau de batterie (%)
- Latitude, longitude, altitude
- Vitesse
- Nom de la mission en cours
- taskId (information sur la tâche du drone en cours)

Il permet également d'afficher les photos prises par les drones dans l'environnement de simulation.

### A.9.3 Complémentarité avec le planificateur de mission

Les couleurs des drones sont les mêmes que le planificateur.



FIGURE A.6 Fiche informative d'un drone



FIGURE A.7 Menu des photos d'un drone

## A.10 Boussole situationnelle

### A.10.1 Description générale

Outil figé en haut de la vision utilisateur afin de repérer l'utilisateur sur son orientation. Il contient un nombre d'informations multiples sur l'emplacement de choses autour de lui. Un

visuel se trouve à la figure A.8.

### A.10.2 Fonctionnalités

Ce widget indique les positions nord, sud, est et ouest. Il contient diverses annotations pour se situer dans l'environnement réel :

- Orientation du drone vis-à-vis de l'utilisateur et la distance qui les sépare.
- Direction des missions en cours.
- Emplacement des personnes et onions.
- L'emplacement des annotations effectué sur l'outil du modèle 3D.



FIGURE A.8 Boussole ainsi que la présence d'un drone proche de l'utilisateur

## A.11 Visibilité de réalité augmentée en terrain réel

### A.11.1 Description générale

Ceci n'est pas considéré comme un outil, cette fonctionnalité regroupe les hologrammes en réalité augmentée pour améliorer la vision sur le terrain. Un visuel se trouve à la figure A.9.

### A.11.2 Fonctionnalités

Cette fonctionnalité améliore la visibilité des drones en situation réelle (bulle colorée lumineuse) et montre en réalité augmentée les points de passage de l'ensemble des missions avec le chemin à parcourir et le drone associé à la mission.



FIGURE A.9 Ajout d'une bulle lumineuse pour améliorer la visibilité des drones

## A.12 Formulaire de rapport de situation du SIM

### A.12.1 Description générale

Formulaire virtuel que devaient remplir les participants pompiers toutes les 10 minutes en situation réelle. Un visuel se trouve à la figure A.10.

### A.12.2 Fonctionnalités

Ce widget récupère l'avis du pompier sur la situation sur les questions suivantes :

- Quel est l'état de la situation ?
- Y a-t-il un manque d'effectif pour la mission ?
- Comment évoluera l'incendie ?

Ces questions proviennent du fonctionnement du SIM pour faire un rapport de la situation. Le pompier le rempli durant la simulation dans le besoin de la simulation et de récolter son ressenti.

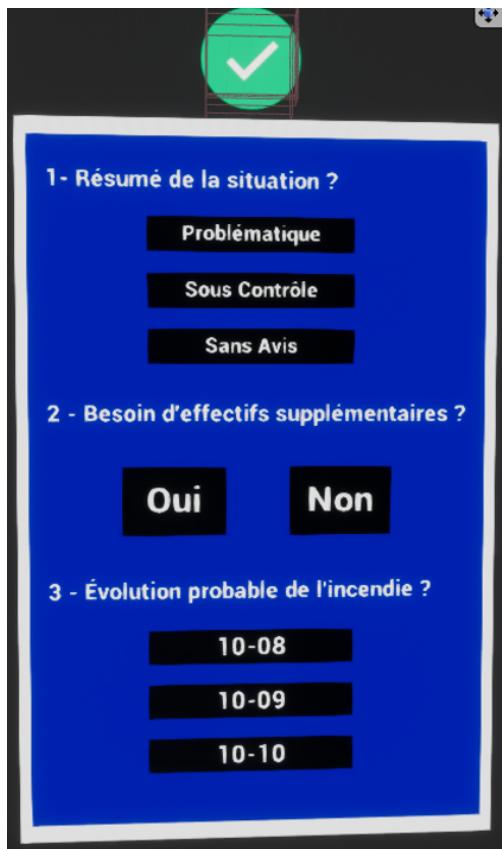


FIGURE A.10 Outil du rapport de situation

## ANNEXE B SCÉNARIO PRÉVU AVEC LES POMPIERS DU SIM

### B.1 Scénario

Nous avions initialement prévu un scénario à expérimenter avec le SIM afin de tester notre technologie RA complète avec planificateur de mission dans une simulation d'urgence. Nous nous serions basés sur les retours de personnes qui travaillent dans le milieu de l'urgence pour déterminer l'efficacité et l'utilité de la réalité augmentée. Ce scénario n'a pas été mis en place.

#### B.1.1 Introduction

Avant de démarrer la simulation, le participant aurait eu une formation auprès d'une personne avec de l'expérience sur l'utilisation de la technologie pour apprendre les interactions possibles qu'il aurait pu faire afin d'utiliser de façon correcte la technologie pour la simulation. La personne qui lui aurait fait l'explicatif l'aurait assisté durant toute l'expérience en cas de besoin, nous la nommerons ici la personne témoin. S'en suivrait normalement le début du scénario de la simulation qui se serait déroulé dans une salle. Le participant aurait été équipé d'un casque RA et aurait eu à sa disposition le planificateur de mission. Il aurait eu face à lui une projection sur un écran géant contenant le BGH virtualisé. La personne témoin lui aurait expliqué alors le descriptif suivant : nous supposons pour introduire le scénario que le pompier se retrouvait avec de l'avance vis-à-vis de la situation, c'est-à-dire qu'il se trouvait déjà devant le bâtiment lorsque celui-ci prend feu. Le participant se retrouvait face au bâtiment imaginé de toute pièce pour la simulation dans la place virtualisée de Square Victoria de Montréal au Canada. Il aurait eu devant lui à sa disposition une flotte de 4 drones virtuels qui pouvaient patrouiller autour du BGH. Cet essaim fonctionnait comme une seule entité autonome qui attendait de recevoir des commandes de la part du participant. L'ensemble des commandes aurait été donné par des interactions depuis le visiocasque RA et le planificateur de mission.

#### B.1.2 Phases

La première phase de l'expérience s'enclenchant alors ici. Le BGH prenait feu au niveau du 3e étage (une seule mission était prévue pour cette expérience). En attendant que les services d'urgence arrivent, le participant aurait eu alors le contrôle des drones pour observer le BGH depuis l'extérieur. Le participant équipé du visiocasque aurait dû résoudre les objectifs suivants :

1. Déterminer le nombre de personnes visibles depuis l'extérieur.
2. Trouver l'ensemble des issues de secours.
3. Déterminer l'emplacement du foyer de l'incendie.

La durée pour réaliser l'objectif aurait été de 6 minutes. Pendant la mission, le participant aurait pu reporter l'ensemble des informations qu'il comprenait au témoin humain qui aurait été présent pour récolter ses informations et assister le participant en cas de besoin.

La seconde phase aurait alors démarré. La personne témoin aurait expliqué au participant que les services d'urgences du SIM arrivaient alors à proximité du bâtiment et auraient été alerté des informations données. Des pompiers virtuels seraient rentrés dans le bâtiment en feu pour tenter de secourir les personnes en danger. Lors de cette seconde phase pour respecter le déroulement d'une mission d'urgence selon le SIM, le participant aurait simplement observé la situation et aurait dû remplir un rapport de situation virtuel sur la situation actuelle depuis le visiocasque RA. Ce rapport doit normalement être effectué en situation réelle avec le SIM toutes les 10 minutes et se serait fait ici exactement deux fois au bout des 3 premières minutes et 3 minutes suivantes. À la fin du remplissage de chaque formulaire, les données renseignées auraient été enregistrées pour comprendre l'efficacité de la technologie.

Le rapport comporte les champs qui sont présentement utilisés selon le travail de Conan [18] :

1. Résumé de la situation actuelle (Problématique / Sous contrôle / Sans avis)
2. Y a-t-il besoin de plus d'effectifs pour la mission ? (Oui / Non)
3. Évolution probable du feu ? (10-08 [aggravation] / 10-09 [non-aggravation] / 10-10 [sous contrôle])

Les pompiers qui sont factices se seraient déplacés dans le BGH pour secourir les victimes une à une. À chaque fois qu'une victime aurait été secourue, la victime aurait «disparu» du milieu virtuel et le participant en aurait été averti. Le participant aurait dû s'assurer que toutes les choses importantes et personnes virtuelles «blessées» qu'il aurait vues auraient été gérées par les pompiers virtuels. Il aurait su également le nombre de personnes secourues qu'il n'aurait pas découvert pendant la phase 1 de l'expérience.

Ensuite, le témoin aurait renseigné (si le participant ne l'aurait pas encore remarqué) que le feu venait du troisième étage du bâtiment. Il aurait appris par le témoin que malheureusement, les pompiers n'auraient pas accès au quatrième étage dû à l'évolution de l'incendie. La dernière mission pour le participant aurait été d'observer le dernier étage à l'aide de ses outils. Le participant aurait du inspecter une nouvelle fois et à nouveau reporter ce qu'il aurait vu à la personne témoin. Lors de cette phase, de nouvelles personnes auraient dû apparaître au quatrième étage et le participant aurait dû les localiser et indiquer leur position

au témoin. L'incendie aurait été alors maîtrisé et l'intervention des pompiers virtuels aurait pu avoir lieu. Les pompiers virtuels seraient alors allés récupérer les personnes indiquées et le participant aurait été informé si les informations transmises auraient été correctes ou non.

### B.1.3 Fin

L'exercice aurait dû se terminer suite à cette action et le participant aurait dû par la suite répondre à plusieurs questionnaires. Les questionnaires auraient été le formulaire NASA-TLX par la NASA ainsi qu'un questionnaire personnalisé au contexte de l'expérimentation. La simulation se déroulant en deux phases distinctes. Il aurait été possible de chronométrier chaque phase pour chaque participant. Nous nous serions servis de l'ensemble de ces informations pour appuyer ou non sur l'utilité de la réalité augmentée pour les situations d'urgences et valider ou non nos hypothèses.

## B.2 Questionnaire

Après que le sujet ait terminé la simulation, des questions lui seront posées afin de comprendre son ressenti et obtenir des résultats afin de répondre à nos hypothèses en section 2.13. Les questionnaires sont les suivants :

- Formulaire NASA-TLX par la NASA
- Questionnaire personnalisé au contexte de l'expérimentation

### B.2.1 NASA-TLX

L'outil NASA-TLX est constitué d'un ensemble de questions qui demande d'échelonner son effort de 0 à 100 dans plusieurs types d'actions mentales et physiques. Dans le cas du scénario donné, il est utile de mesurer l'effort du pompier afin de comprendre la complexité des tâches et d'évaluer si l'information est correctement traitée par le système proposé pour être facilement compris. Il permet d'un côté de comprendre le niveau de difficulté éprouvé par le sujet en termes d'utilisation physique des technologies. Et, d'un autre côté, la gestion de l'ensemble des informations des actions à entreprendre pour l'effort mental.

Les questions de ce formulaire figurent dans le tableau 2.5.

### B.2.2 Questionnaire lié au contexte de l'expérimentation

L'expérience étant adaptée aux opérateurs de l'urgence pour une technologie spécifique, les questions ont pour but de déterminer si la technologie présentée apporte une amélioration aux opérations actuelles. Les questions abordent notamment le confort de l'utilisation de la réalité augmentée pour interagir avec le système autonome. Nous avons besoin de comprendre les avantages et désavantages de la technologie et pour déterminer si les outils sont adaptés à la situation. Chaque question qui se trouve dans la table B.1 se verra la possibilité d'avoir comme réponse des valeurs entre 0 à 5 selon les significations suivantes :

- 0 - Aucun avis
- 1 - Totalement en désaccord
- 2 - Plutôt en désaccord
- 3 - Neutre
- 4 - Plutôt d'accord
- 5 - Totalement d'accord

Pour chaque question soumise, un champ supplémentaire sera présent afin de récolter les commentaires afin de détailler les choix de réponse. Un autre champ sera aussi inclus pour récolter d'autres avis et remarques des sujets qui expérimenteront l'expérience. Le tableau B.1 contient le questionnaire qui sera soumis aux opérateurs à la fin de la simulation.

TABLEAU B.1 Formulaire personnalisé pour l'expérience

#### 1 Questions techniques sur la technologie proposée

1.1	Les interactions en réalité augmentée étaient simples et intuitives.
1.2	Les informations des drones qui composent le système autonome étaient pertinentes.
1.3	Visualiser les informations et les photos des drones était facile.
1.4	L'outil de géolocalisation (compas / boussole) était utile.
1.5	Créer des chemins pour les drones était facile.
1.6	Visualiser le modèle réduit du BGH en trois dimensions a été utile.

#### 2 Questions sur la difficulté du système

2.1	L'utilisation de la tablette comme planificateur de mission était pertinente.
2.2	Gérer le système autonome composé de drone était facile.

2.3	La technologie présentée pour l'expérience de manière générale était simple d'utilisation.
-----	--

### 3 Questions sur la logistique

3.1	La réalité augmentée ne m'a pas obstrué ma vision réelle.
3.2	L'utilisation du visiocasque ne m'a pas gêné.
3.3	Utiliser la tablette comme planificateur de mission était pratique avec le visiocasque.

### 4 Questions sur la problématique de la recherche

4.1	Le scénario de la simulation était pertinent.
4.2	Je n'étais pas confus durant l'expérience.
4.3	La réalité augmentée m'a permis de mieux comprendre ou comprendre plus rapidement la situation.
4.4	J'aurais économisé du temps sur la mission grâce à la technologie proposée comparée aux missions que j'ai vécues en situation réelle.
4.5	Cette technologie pourrait sensiblement être un atout pour le SIM.
4.6	J'ai trouvé l'expérience intéressante.

#### B.2.3 Informations mesurables

La simulation se déroulant en deux phases distinctes. Il est possible de mesurer le temps émis pour chaque phase pour chaque pompier sans pour autant avoir de comparatif.

On peut donc mesurer :

- Phase 1 : Exploration des alentours du bâtiment pour détecter des personnes (en secondes).
- Phase 2 : Exploration des alentours du quatrième étage du BGH(en secondes).
- Phase 2 : La perception de la situation via le formulaire de rapport de situation.

Les questionnaires ont été arrangés pour récupérer le maximum de paramètres mesurables. Avec le formulaire personnalisé ainsi que le NASA-TLX, on recense 24 paramètres.

## ANNEXE C INFORMATIONS FOURNIES AU PARTICIPANT POUR L'EXPÉRIENCE

Cette partie donne toutes les informations qui sont fournies au participant tout au long de l'expérience. Ces informations sont disponibles en tout temps pour la personne durant l'expérimentation.

**Il est possible en tout temps d'arrêter l'exercice si vous ressentez un quelconque vertige, mal de tête ou malaise durant toute la séance.**

### C.1 Mise en situation

Un incendie a été détecté dans un bâtiment de grande hauteur à Montréal situé dans la place de Square Victoria. Vous vous retrouvez directement sur le lieu du drame avant les pompiers, équipé d'un système composé de 4 drones autonomes avec des caméras. Les drones vont partir effectuer une patrouille autour du bâtiment (mais ne rentrent pas à l'intérieur). Vous êtes dans cette situation parce que vous venez officiellement de rejoindre l'organisme de test des nouvelles technologies émergentes de Polytechnique Montréal. Votre mission est d'analyser les informations fournies par le système de drone en utilisant une technologie afin de récupérer le maximum d'informations possibles sur l'incendie afin de les fournir aux pompiers avant qu'ils ne débarquent sur les lieux (c'est-à-dire environ 5 minutes). Voici les informations que vous devrez rapporter le plus précisément possible et renseigner dans la fiche mission à la fin de l'opération :

- Le foyer de l'incendie dans le bâtiment (étage et emplacement au plus précis)
- Le nombre d'adultes et d'enfants dans l'enceinte du bâtiment (étage et emplacement au plus précis pour chaque personne).

Pour chaque situation, la simulation sera différente. Vous serez équipé pour chaque scénario d'une technologie différente afin de comparer leurs utilisations ainsi que vos résultats. Deux technologies seront testées durant cet exercice :

- Une station de contrôle (ordinateur) retournant le visionnement des caméras présent sur des drones ainsi que la localisation GPS d'où se situe la caméra du drone et diverses informations.
- Un casque de réalité augmentée se servant d'hologrammes pour améliorer la perception de l'information des drones et du retour caméra (Magic Leap 1).

## C.2 Déroulement de l'exercice

Avant chaque mission, une courte formation sera effectuée au préalable pour vous mettre à l'aise avec la technologie que vous allez utiliser. Vous allez commencer l'exercice en vous retrouvant face à un affichage qui représente la virtualisation d'un bâtiment de grande hauteur composée de 4 étages qui prendra feu. Cet affichage vous montrera un bâtiment ainsi que 4 drones devant vous.

Vous n'aurez pas besoin de vous déplacer durant l'exercice. Seuls les drones seront en déplacement.

Au moment où la mission démarre, les drones vont commencer leur tour et vous recevrez un retour vidéo de chaque drone pendant tout l'exercice. Les drones sont complètement autonomes et ne requièrent aucune action de votre part si ce n'est de l'attention sur les vidéos de leur caméra et leur position. Chaque drone effectuera une ronde autour du bâtiment sur un étage précis, c'est-à-dire que les drones vont effectuer la même trajectoire à des altitudes différentes signifiant que chaque retour vidéo est unique. Vous avez donc 4 drones qui vont chacun s'occuper d'un étage sur les 4 étages du bâtiment. Lorsque les drones finissent leur patrouille, ils repartent automatiquement refaire la même trajectoire une dernière fois et vous serez averti quand ce sera le cas.

La durée totale d'une mission est de 5 minutes, au bout de ce temps l'opération s'arrêtera. Il n'est pas interdit de finir plus tôt que le temps imparti selon votre assurance afin de mesurer l'efficacité du système que vous utilisez.

Durant l'opération, vous n'aurez pas le droit (sauf en cas de problème) de contacter une autre personne dans le but de rester concentrer sur l'exercice. Vous aurez également accès à des feuilles en papier et un crayon pour prendre des notes durant l'exercice et vous aider à mémoriser les informations, vous avez le droit de préparer votre feuille au préalable.

Lorsque vous arrêterez l'exercice ou que le temps maximal sera écoulé, vous devrez remplir un rapport de mission pour chaque situation. Votre rapport sera anonymisé et utilisé à des fins de recherche. Vous avez accès en tout temps à ces rapports. Il est quand même demandé de les remplir à la fin de chaque exercice. Enfin, on vous demandera de remplir un troisième rapport afin de donner votre avis subjectif sur le déroulement des opérations et des technologies utilisées. Après avoir rempli le dernier rapport, l'expérience se terminera. Après l'expérience, il est souhaitable de ne parler à quiconque des informations que vous aurez rapportées pour éviter de fausser l'expérience avec d'autres personnes.

Le but de cet exercice est de comprendre si ces technologies sont utiles dans une situation d'urgence mais aussi de confronter leur efficacité ainsi que leur simplicité de compréhension

et d'utilisation. Les deux scénarios doivent être effectués avec le maximum de sérieux et concentration. Plus vos informations seront précises et crédibles et plus votre résultat sera bonifié. Cependant, donner des indications qui sont erronées ou incertaines peut générer l'effet inverse et décrédibilisera vos résultats. Imaginez-vous que cet exercice est réel en supposant que ce que vous rapporterez sera fourni à des pompiers sur le terrain avant qu'ils pénètrent dans le bâtiment.

**Interaction possible avec le système 1 – Station de contrôle 2D (ordinateur)**  
**figure C.1 :**

- L'application contient le retour vidéo des 4 drones simultanément ainsi qu'une fiche informative sur l'état des drones en temps réel.
- Un bouton en forme de cible est disponible pour chaque drone afin de sauvegarder la position GPS du drone et marquer la position sur la minicarte.
- Il est possible d'effectuer un focus sur un drone en particulier en cliquant sur le bouton contenant le nom du drone. Ce menu contient les positions GPS sauvegardées avec le bouton en forme de cible

**Interaction possible avec le système 2 – Visiocasque de réalité augmentée : figure C.2 :**

- L'application affichera des informations supplémentaires par-dessus la simulation (au niveau du bâtiment en feu).
- Il y a trois widgets disponibles sur l'application : i) La gestion des 4 caméras des drones. Un bouton en forme de cible est disponible pour sauvegarder l'emplacement du drone en temps réel (sur la mini carte) au niveau de la simulation. Il y a également un bouton pour faire un focus sur un drone spécifique. ii) La fiche informative sur l'état d'un drone. iii) Une mini carte représentant l'emplacement des drones vis-à-vis du bâtiment avec les 4 points cardinaux. Ces widgets sont affichés devant l'utilisateur



FIGURE C.1 Interface de la station de contrôle 2D

à gauche ou à droite selon la préférence de l'utilisateur.

- Pour interagir avec le système et appuyer sur des boutons, il faut se servir de ces index. Le suivi des index est correct lorsque vous verrez un cube transparent au niveau de votre index.

Si cela peut vous aider à vous repérer au sein de l'environnement, voici plusieurs indications :

- Vous verrez la face avant du bâtiment et le building fait face au nord-est, votre regard porte donc en direction du sud-ouest.
- La face droite du bâtiment vis-à-vis de vous pointe vers le nord-ouest et inversement la face gauche pointe vers le sud-est.
- L'arrière de la bâtisse n'est pas vitré.
- À Montréal en août le soleil se lève à l'est (nord-est) et se couche à l'ouest (nord-ouest).

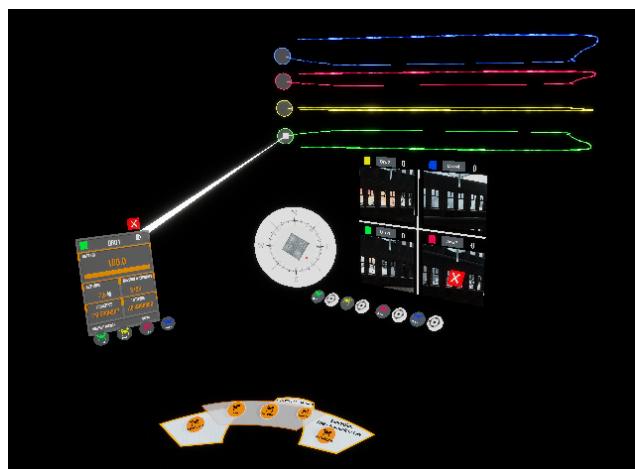


FIGURE C.2 Interface en réalité augmentée avec widgets et superposition d'information sur la simulation

## ANNEXE D QUESTIONNAIRE PERSONNALISÉ SOUMIS AUX PARTICIPANTS DE L'EXPÉRIENCE

Dany NASER ADDIN

### Questionnaire personnalisé pour l'expérience en situation d'urgence

#### Informations :

Pour chaque question mentionnée ci-dessous, veuillez renseigner un choix parmi les propositions suivantes avec leur signification :

- 0 → Aucun avis
- 1 → Totalement en désaccord
- 2 → Plutôt en désaccord
- 3 → Neutre
- 4 → Plutôt d'accord
- 5 → Totalement d'accord

⚠ Ne cocher qu'une seule case pour chaque question s'il vous plaît ! ⚡

Vous pouvez ajouter un commentaire pour détailler votre réponse si vous le souhaitez.

Pour remplir un commentaire veuillez remplacer chaque champ « ... » par votre remarque.

Essayez d'être le plus complet possible, merci d'avance !

---

#### 1. Informations générales

**Nom :** .....

**Prénom :** .....

**Âge :** ..... ans

**Identité de genre :**

Homme       Femme       Autre (veuillez préciser)

#### 2. Questions techniques sur la technologie proposée en réalité augmentée

##### 2.1. Interagir avec les mains sur les boutons en réalité augmentée était simple et intuitif.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....

##### 2.2. Visualiser les vidéos des caméras des drones en réalité augmentée était facile.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....

**2.3. L'outil de mini map (carte 2D) en réalité augmentée était utile.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**2.4. L'outil de fiche informative sur les drones était utile.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**2.5. La superposition de la réalité augmentée sur l'environnement de simulation (bâtiment en feu) avait permis de mieux comprendre le fonctionnement du système de drones et la situation.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**2.6. La réalité augmentée m'avait permis d'être plus sûr de moi sur mes décisions durant l'exercice.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

## 3. Questions sur la difficulté du système

3.1. De manière générale, la réalité augmentée testée pour l'expérience était simple d'utilisation en tant que première expérience.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

3.2. De manière générale, la technologie de la station 2D d'ordinateur testée pour l'expérience était simple d'utilisation.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

3.3. De façon subjective, quelle technologie avez-vous le plus appréciée de pratiquer l'exercice.

- : 0 – Station de contrôle 2D (ordinateur)  
 : 1 – Visiocasque de réalité augmentée (Magic Leap 1)

Commentaire :

.....  
.....  
.....

## 4. Questions sur la logistique

4.1. La réalité augmentée n'avait pas obstrué ma vision dans le monde réel quand j'en avais le besoin.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

4.2. Le port du visiocasque sur ma tête n'avait pas obstrué mes mouvements dans le monde réel.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

4.3. Le port du visiocasque sur ma tête ne m'avait pas gêné ou blessé.

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3 – Neutre  
 : 4 – Plutôt d'accord  
 : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

## 5. Questions sur la problématique de la recherche

**5.1. J'ai trouvé qu'il y avait beaucoup d'informations et que l'expérience était difficile.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3– Neutre  
 : 4– Plutôt d'accord  
 : 5– Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**5.2. Pour une première utilisation, je n'ai pas trop eu de difficulté à m'adapter avec la technologie de réalité augmentée.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3– Neutre  
 : 4– Plutôt d'accord  
 : 5– Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**5.3. La réalité augmentée m'avait permis de comprendre aussi bien ou mieux la situation comparée à l'ordinateur.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3– Neutre  
 : 4– Plutôt d'accord  
 : 5– Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**5.4. Je n'étais pas confus durant l'expérience.**

- : 0 – Aucun avis  
 : 1 – Totalement en désaccord  
 : 2 – Plutôt en désaccord  
 : 3– Neutre  
 : 4– Plutôt d'accord  
 : 5– Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**5.5. Le scénario de la simulation était pertinent.**

- : 0 – Aucun avis
- : 1 – Totalement en désaccord
- : 2 – Plutôt en désaccord
- : 3 – Neutre
- : 4 – Plutôt d'accord
- : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**6. Remarques générales**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**5.6. J'ai trouvé l'expérience intéressante.**

- : 0 – Aucun avis
- : 1 – Totalement en désaccord
- : 2 – Plutôt en désaccord
- : 3 – Neutre
- : 4 – Plutôt d'accord
- : 5 – Totalement d'accord

Commentaire :

.....  
.....  
.....

**Merci d'avoir répondu aux questions et de  
votre participation !**

## ANNEXE E RAPPORT DE MISSION POUR L'INCENDIE D'UN BGH DE 4 ÉTAGES

Dany NASER ADDIN

### Rapport de situation sur l'incendie d'un BGH de 4 étages

#### Informations :

*L'ensemble des informations que vous remplissez dans les rapports seront anonymes et utilisées à des fins de recherche. Il est déconseillé de divulguer ce que vous rapporterez ici à d'autres personnes.*

#### 1. Informations générales

Date : 2020 / /

Nom : .....

Prénom : .....

Âge : ..... ans

#### Identité de genre :

Homme  Femme  Autre (veuillez préciser) .....

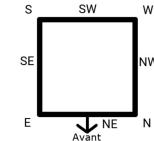
#### 2- Informations sur les conditions de l'incendie

##### • Technologie utilisée pour la situation :

Station de contrôle (écran 2D)  Visiocasque de réalité augmentée

##### • Emplacement du foyer de l'incendie (soyez le plus précis possible) :

Étage : .....



.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

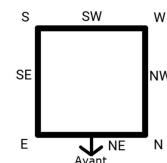
## 3- Bilan humain

• Nombre de personne(s) adulte(s) identifiée(s) : .....

• Nombre d'enfant(s) identifiée(s) : .....

Type :  Adulte  Enfant

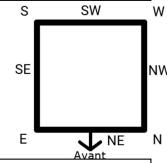
Localisation : .....  Étage : .....



• Informations sur la personne (soyez le plus précis possible) :

Type :  Adulte  Enfant

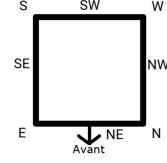
Localisation : .....  Étage : .....



• Informations sur la personne (soyez le plus précis possible) :

Type :  Adulte  Enfant

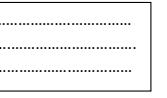
Localisation : .....  Étage : .....



• Informations sur la personne (soyez le plus précis possible) :

Type :  Adulte  Enfant

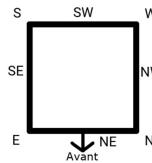
Localisation : .....  Étage : .....



• Informations sur la personne (soyez le plus précis possible) :

Type :  Adulte  Enfant

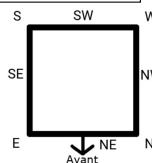
Localisation : .....  Étage : .....



• Informations sur la personne (soyez le plus précis possible) :

Type :  Adulte  Enfant

Localisation : .....  Étage : .....



Plusieurs feuilles pour cette partie peuvent s'avérer nécessaires

Veuillez ignorer cette partie et ne pas la remplir

Type de scénario :

Scénario 1  Scénario 2

Ordre :

Premier exercice  Second exercice

Temps requis : ..... minute(s) et ..... seconde(s)