



**HAL**  
open science

# Application d'une nouvelle taxonomie à la conception et l'évaluation ergonomique de systèmes de réalité augmentée pour le fantassin

Thomas Dazenière

## ► To cite this version:

Thomas Dazenière. Application d'une nouvelle taxonomie à la conception et l'évaluation ergonomique de systèmes de réalité augmentée pour le fantassin. Psychologie. Université de Lorraine, 2014. Français. NNT : 2014LORR0374 . tel-01754600

**HAL Id: tel-01754600**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754600>**

Submitted on 30 Mar 2018

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

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



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UFR Sciences Humaines et Arts, Département de Psychologie

École Doctorale Stanislas

THÈSE

Pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Université de Lorraine

Discipline : Ergonomie

Par  
Thomas DAZENIERE

Le 03 mars 2014

# Application d'une nouvelle taxonomie à la conception et l'évaluation ergonomique de systèmes de réalité augmentée pour le fantassin

Directeur de thèse  
J.M. Christian Bastien, PU

Membres du Jury :

Margarita Anastassova, Ingénieur Chercheur, CEA (Examinatrice)  
J.M. Christian Bastien, Professeur, Université de lorraine (directeur de thèse)  
Jean-Marie Burkhardt, Directeur de recherche IFFSTAR (Rapporteur)  
Jérôme Dinet, maître de conférences-HDR, Université de Lorraine (Examineur)  
Pascal Gaden, Ergonome sénior, Sagem défense et sécurité (Tuteur industriel)  
Charles Tijus, Professeur, Université Paris 8 (Rapporteur)



# Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu Christian Bastien, qui m'a fait l'honneur d'être mon directeur de thèse et qui a su m'apporter son aide durant ces années de doctorat et notamment à concilier les aspects industriels et scientifiques d'une thèse CIFRE.

Je tiens particulièrement à remercier M. Burkhardt, M. Tijus, Mme Anastassova et M. Dinet d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse, et ainsi apporter un regard scientifique extérieur à ce travail.

Je tiens aussi à remercier mon entreprise d'accueil, qui m'a fait confiance et, sans qui, cette thèse n'aurait pu être possible. Sagem m'a fourni un cadre de travail motivant et enrichissant et en particulier mes collègues et amis de l'équipe FH. Nous avons su créer ensemble le plus important : un esprit d'équipe.

Je remercie ma famille qui m'a soutenu toutes ces années d'étude et qui m'a permis d'être ici aujourd'hui et particulièrement ma mère et ma tante Annie que je considère comme une deuxième mère.

Et enfin, je n'ai pas de mots pour remercier Laurine, qui a été et qui est ma force depuis près de trois ans, je t'aime ma bulle.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Table des matières</b>	<b>5</b>
<b>1. Introduction : Contexte et objectifs de la thèse</b>	<b>7</b>
1.1 Contexte industriel de la thèse	7
1.2 Objectifs de la thèse	8
<b>État de l'art et cadre théorique</b>	<b>9</b>
<b>2. La réalité augmentée : applications, technologies et définitions</b>	<b>10</b>
2.1 Les domaines d'application de la RA	11
2.2 Les technologies de la RA	17
2.3 Définitions et taxonomies de la RA	27
2.4 De la RA aux espaces perceptifs augmentés	36
<b>3. Réalité augmentée et ergonomie</b>	<b>39</b>
3.1 Études ergonomiques de la RA : Une pratique émergente	40
3.2 Les problématiques ergonomiques abordées	44
3.3 La perception « naturelle » des distances	46
3.4 La perception des distances en réalité virtuelle et augmentée	52
<b>4. Synthèse de l'état de l'art et problématiques</b>	<b>72</b>
4.1 La RA : un concept polymorphe à définir	72
4.2 Ergonomie et RA : des problématiques spécifiques	72
4.3 Perception des distances en RA : une problématique majeure	73
<b>Élaboration et Application d'une taxonomie pour la RA</b>	<b>76</b>
<b>5. Taxonomie de la RA : proposition et première application</b>	<b>78</b>
5.1 Présentation de la classification WOTSH&R	78
5.2 Application de la classification WOTSH&R	87
<b>6. Application de la taxonomie à l'évaluation exploratoire</b>	<b>103</b>
6.1 Évaluation de reconstituteurs	104
6.2 Étude de la visibilité et de la lisibilité	114
6.3 Évaluation de la compréhension de la situation	128
6.4 Conclusion générale sur les études exploratoires	139

<b>7. Application de la taxonomie à la conception</b>	<b>141</b>
7.1 Introduction	141
7.2 Démonstrateur 1 : Le concept d'IHM RA sur arme et interaction pseudo-tangible	142
7.3 Démonstrateur 2 : Le concept d'IHM RA sphérique et interaction gestuelle	145
7.4 Conclusion	147
<b>Problèmes de perception des distances en RA</b>	<b>149</b>
<b>8. Études expérimentales de la perception des distances en RA</b>	<b>151</b>
8.1 Effet de la représentation graphique	152
8.2 Effet de la dominance oculaire et de l'apprentissage	160
<b>Conclusion générale</b>	<b>177</b>
<b>9. Conclusions et apports de la thèse</b>	<b>179</b>
9.1 Synthèse des contributions conceptuelles	179
9.2 Synthèse des contributions industrielles	181
<b>10. Perspectives et travaux futurs</b>	<b>183</b>
10.1 Perspectives scientifiques	183
10.2 Perspectives liées à la taxonomie WOTSH&R	183
10.3 Perspectives industrielles	184
<b>Bibliographie</b>	<b>185</b>
<b>Annexes</b>	<b>195</b>
<b>Annexe 1 - Analyse comparative théorique des restitués de RA</b>	<b>196</b>
A1.1 Comparaison du facteur de configuration : HMD vs HHD vs Déporté	196
A1.2 Comparaison de la restitution : monoculaire VS bi-oculaire VS binoculaire	207
A1.3 Comparaison de la transparence : optique VS vidéo VS immersif	214
<b>Annexe 2 - Plan d'évaluation ergonomique de systèmes de RA</b>	<b>223</b>
A2.1 Objectifs	223
A2.2 Méthodologie	224
A2.3 Critères et métriques d'évaluation des systèmes de RA	237

# 1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

---

## 1.1 CONTEXTE INDUSTRIEL DE LA THESE

Les travaux présentés ici ont été effectués dans le cadre d'une thèse CIFRE en partenariat avec la société Sagem du groupe SAFRAN. Plus précisément, cette collaboration s'est déroulée au sein de la division optronique et défense qui a notamment en charge la conception et le développement de produits militaires destinés à l'armée de terre et au combat terrestre. Le FELIN (Fantassin à Equipements et Liaisons INtégrés) est un exemple majeur de systèmes développés par Sagem pour l'armée de terre française, ayant pour objectif la modernisation des équipements du combattant et l'amélioration de ses capacités tactiques.

Que ce soit dans le domaine civil ou militaire, les progrès technologiques de ces dernières décennies ont permis l'émergence de nouveaux systèmes de communication facilitant grandement les échanges d'information. Ces nouvelles capacités de partage d'informations tactiques ont été étudiées à plusieurs reprises dans le domaine militaire et notamment dans le cadre de projets Sagem-DGA. Ont alors émergé des questionnements sur les moyens de restituer ces données dans le contexte du combattant débarqué. Le système SCIV (Système Combattant Info-Valorisé) a notamment exploré le concept de « Réalité Augmentée » ou RA, pour fournir ces informations tactiques directement dans le champ de vision du soldat via l'emploi de « lunettes » de restitution tête haute ou Head-Mounted Display (HMD).

Rapidement, l'usage de ce type de dispositif souleva de nombreuses problématiques techniques mais aussi de l'ordre des Facteurs humains. En effet, ces nouvelles interfaces émergentes sont fondamentalement différentes des IHM classiques en deux dimensions sur écrans. Elles soulèvent donc des problématiques ergonomiques spécifiques qui doivent être étudiées afin de concevoir des systèmes de RA pertinents et adaptés à l'activité du fantassin débarqué du futur.

Ce contexte industriel constitue le point de départ de cette thèse et a fortement orienté les objectifs et les axes de recherche poursuivis durant ces travaux.

## 1.2 OBJECTIFS DE LA THESE

Dans ce contexte, l'objectif initial de cette thèse était précisément de fournir des éléments de réponse pour concevoir des systèmes de RA qui puissent répondre aux besoins de l'activité du fantassin et qui soient utilisables dans cet environnement particulier.

Cependant, la plupart des études réalisées dans le domaine de la RA sont uniquement centrées sur des problématiques techniques. A ce jour et comme nous le montrerons dans la section 3.1, il n'y a que peu d'études centrées utilisateurs dans la littérature. Ce constat pose problème car même si la RA offre potentiellement des gains opérationnels importants, elle soulève aussi de nombreuses problématiques ergonomiques non résolues.

Bien que les résultats de certains travaux sur l'utilisabilité d'autres types d'interfaces puissent être transposés à la RA, l'affichage d'informations virtuelles directement dans l'environnement réel d'un utilisateur diffère profondément des interfaces classiques. Finalement, ce point soulève une question centrale : qu'est que la RA ? Qu'est ce qui la différencie des autres IHM ? Et par extension, quels sont les problèmes ergonomiques spécifiques de la RA ?

Afin de pouvoir fournir des recommandations ergonomiques pour la conception, les travaux de cette thèse se sont donc orientés, dans un premier temps, vers l'élaboration d'un cadre d'analyse de la RA. Ce dernier fournit les moyens d'étudier le facteur X, c'est-à-dire les impacts spécifiques de la RA sur les capacités perceptives et cognitives d'un utilisateur. Ce *framework* a été appliqué au travers de différentes études exploratoires dans le cadre du fantassin débarqué et a notamment permis d'identifier et de traiter par la suite la problématique de la perception des distances.

Ce manuscrit présente en première partie, un état de l'art et le cadre théorique, puis une deuxième partie sur l'élaboration du *framework* et son application et enfin une dernière partie présente la démarche scientifique employée pour l'étude de la sous-estimation des distances en RA.

# **État de l'art et cadre théorique**

## 2. LA RÉALITÉ AUGMENTÉE : APPLICATIONS, TECHNOLOGIES ET DÉFINITIONS

---

Le terme de réalité augmentée (RA) a été introduit dans les années 1990 par Caudell et Mizell (1992), pour désigner un système permettant l'ajout d'éléments virtuels directement dans l'environnement réel pour guider un utilisateur lors d'une tâche de maintenance. Même si cette première apparition du terme est relativement récente, des travaux antérieurs ont été menés sur les visiocasques et autres dispositifs permettant la superposition d'information virtuelle sur le réel (Sutherland, 1963). Mais la RA n'a connu son essor que depuis les deux dernières décennies grâce aux progrès réalisés dans les différentes technologies sous-jacentes à ce domaine. Il est indéniable que la RA est considérée comme étant une technologie émergente, mais elle ne peut être réduite à une simple définition technique.

Comme nous le montrerons dans ce chapitre, le concept de RA peut s'appuyer sur un ensemble de technologies très diverses, selon le contexte d'application ou même le type d'augmentation. En outre, le principe d'ajouter des éléments virtuels dans l'environnement réel perçu par l'utilisateur ne concerne pas que la vision, mais peut potentiellement s'appliquer à toutes les modalités. Même si la RA visuelle est la plus largement répandue, il existe des exemples d'application s'appuyant sur d'autres modalités sensorielles tel que l'haptique (Bayart, 2007; Kron & Schmidt, 2005), ou encore l'ouïe (Albrecht, Lokki, & Savioja, 2011; Bederson, 1995). Dans le cadre de cette thèse nous nous intéresserons uniquement à la RA visuelle.

Définir la réalité augmentée n'est pas aussi simple et direct qu'il n'y paraît à priori. Comme le montre la section suivante, le caractère polymorphe de la RA conduit à s'interroger sur les régularités de ces applications qui permettent de toutes les considérer comme des interfaces de RA d'une part et d'identifier leurs différences afin de construire une classification des systèmes de RA d'autre part. A l'instar de la première partie de ce chapitre qui présentera la diversité technologique de la RA, La seconde partie présentera les différentes classifications et taxonomies proposées dans la littérature.

## 2.1 LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA RA

Ces dernières décennies, de nombreuses avancées ont été faites dans différentes branches technologiques tant logicielles que matérielles. Ces évolutions ont permis de multiplier les solutions aux problèmes techniques rencontrés dans le développement de systèmes de RA. Cette diversité s'est accompagnée de l'apparition de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que leurs choix techniques. Ainsi, actuellement, on trouve des exemples de système de RA :

**Dans l'industrie** : par exemple pour la maintenance (Anastassova, Mégard, Burkhardt, & Breda, 2006; Marsot & Govaere, 2008), la Conception Assistée par Ordinateur (Sener & Wormald, 2008; Woohun & Jun, 2005), la logistique (Reif et al., 2009) et la soudure (Park, Schmidt, Schlick, & Luczak, 2007).

**En médecine** pour la chirurgie (Navab, Traub, Sielhorst, Feuerstein, & Bichlmeier, 2007; Shuhaiber, 2004; Son-Lik, Chee-Keong, Ming-Yeong, Ng Wan, & Keck-Voon, 1998).

**Dans l'aviation** : pour l'aide au pilotage (Aragon, 2004) et le contrôle aérien (Fulbrook, Ruffner, & Labbe, 2008; Ruffner & Fulbrook, 2007).

**Dans les loisirs** : le jeu (Avery, Piekarski, Warren, & Thomas, 2006; Rohs, 2007), le tourisme (Damala, Cubaud, Bationo, Houlier, & Marchal, 2008; Stricker, 2002; Vlahakis et al., 2001).

**Dans la défense** : Pour l'aide au pilotage de drone (Calhoun, Draper, Abernathy, Delgado, & Patzek, 2005), pour le fantassin (Julier, Baillot, Lanzagorta, Brown, & Rosenblum, 2000), pour l'aide au pilotage d'hélicoptère (Rash, 2008).

Plus qu'une technologie, la réalité augmentée est un concept qui semble pouvoir être adapté sous des formes aussi variées que ses contextes d'usage. Les quelques exemples suivants sont présentés afin d'illustrer cette diversité de la RA. Chacune de ces applications diffère soit du point de vue technique (matériel employé et/ou IHM) soit du contexte d'utilisation.

## 2.1.1 La RA pour le fantassin : le projet BARS

Historiquement, les premières applications de la réalité augmentée sont apparues dans le domaine militaire sous la forme de système d'aide pour les pilotes d'avion et d'hélicoptères (Rash, 2008). Il n'est donc pas surprenant de trouver d'autres utilisations dans la défense.

Le projet BARS (*Battlefield Augmented Reality System*), mené par le *Naval Research Laboratory*, (Julier et al., 2000) vise à étudier et développer un système d'aide en RA pour le fantassin débarqué. L'objectif est de fournir au soldat des informations tactiques en temps réel directement dans son champ visuel afin d'améliorer sa conscience de la situation (*Situation Awareness* ou SA).

Comme l'illustre la Figure 1, il s'agit ici d'un système mobile qui permet à l'utilisateur de percevoir des informations augmentées via un restituuteur HMD. Ce dernier permet d'afficher directement les informations tactiques en superposition à l'environnement réel perçu par l'utilisateur. De plus, ces informations étant géolocalisées et le point de vue de l'utilisateur étant connu, elles sont correctement positionnées dans son champ de vision en cohérence avec l'environnement réel.



Figure 1: Illustration du système BARS

Dans cette application, le concept de réalité augmentée est utilisé afin de fournir au fantassin des informations contextualisées qui viendront enrichir sa perception du champ de bataille. Comme le montre l'image de droite dans la Figure 1, ce système permet d'afficher un itinéraire à suivre (flèches vertes), un bâtiment cible (rectangle rouge) et même le contour (violet) des bâtiments présents dans le champ de vision. L'ensemble de ces informations contribue à fournir une meilleure conscience de l'environnement et donc potentiellement un avantage tactique aux fantassins équipés.

## 2.1.2 La RA pour le pilotage de drone : le projet SCS

Le projet *SmartCam3D System (SCS)* (Calhoun et al., 2005) mené par le AFRL/HE (*Air Force Research Laboratory's Warfighter Interface Division*) et *Rapid Imaging Software* vise à évaluer l'intérêt d'un système d'aide au pilotage de drone ou d'UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Ce logiciel permet d'ajouter des éléments virtuels incrustés en temps réel dans la vidéo de la caméra embarquée de l'UAV. Dans la Figure 2, le pilote voit, en plus de l'environnement réel dans lequel évolue le drone, des informations sur sa mission (positions des menaces, zones d'interdiction, trajectoire, etc.). De plus, le système permet d'inverser la visualisation en affichant un environnement virtuel 3D dans lequel est positionnée la vidéo du drone (cf. dernière image de la figure 2).

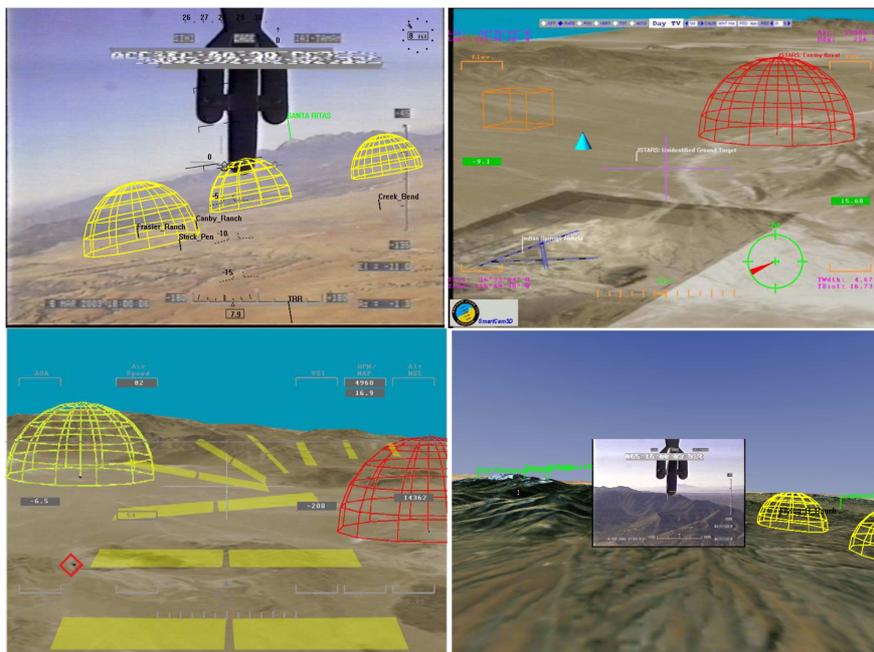


Figure 2: Illustration de l'interface du SCS

L'intérêt et le challenge des UAV est que le pilote du véhicule ne se trouve pas physiquement dans l'environnement de celui-ci. En effet, la station de contrôle est située au sol parfois à plusieurs kilomètres de la position de l'UAV. Les informations augmentées que perçoit l'utilisateur concernent donc l'environnement du véhicule. Dans ce cas et tous les contextes de téléopération, la réalité qui est augmentée n'est pas l'environnement réel direct de l'utilisateur mais un espace perceptif distant où se déroule l'activité.

Cet exemple diffère profondément du précédent : les techniques d'affichage, les IHM et même la nature de l'environnement augmenté sont différents. Pourtant, ces deux applications s'appuient sur le concept de réalité augmentée.

### 2.1.3 La RA médicale : le projet MEDARPA

A l'instar du domaine militaire, la RA semble pouvoir apporter de prometteuses applications pour la médecine. Le Projet *MEDical Augmented Reality for PAtient* (MEDARPA) (Schwald et al., 2004) vise à développer et évaluer un système de réalité augmentée permettant d'effectuer des interventions médicales moins invasives. En effet, ce type d'intervention a l'avantage de réduire les traumatismes pour les patients, mais au détriment de la visibilité de la zone à opérer pour le médecin. La RA peut potentiellement résoudre ce conflit, en permettant d'afficher directement sur le patient les informations d'imageries préopératoires nécessaires à l'intervention, tout en réduisant l'importance des incisions.



Figure 3: Illustration du système MEDARPA

Comme l'illustre la Figure 3, le système présenté dans ce projet se compose d'un écran positionné au dessus du patient et manipulable par le médecin. Celui-ci peut ainsi voir directement les informations augmentées et le corps du patient fusionnés en temps réel sur un seul restituteur. L'écran est fixé sur un bras articulé, permettant ainsi de libérer les mains du médecin pour les besoins de sa tâche. Le dispositif est peu intrusif et n'altère pas la mobilité ainsi que le champ visuel naturel de l'utilisateur. Dans cet exemple, l'utilisateur (le médecin) ne porte aucun équipement spécifique contrairement aux applications précédentes. De plus, ce type de restitution peut potentiellement être employé par plusieurs utilisateurs simultanément.

### 2.1.4 La RA de loisir : le projet WUW (*sixth sense*)

Une représentation encore différente de RA fut présentée dans le cadre du projet *Wear Ur World (WUW)* du MIT (Mistry, Maes, & Chang, 2009). Le système présenté ici est innovant dans le sens où les informations ne sont pas présentées à l'utilisateur sur un reconstituteur mais directement affichées dans l'environnement réel, via un vidéoprojecteur portable. De plus, le système est pourvu d'un dispositif d'interaction tout aussi innovant, basé sur la reconnaissance gestuelle. L'utilisateur peut donc interagir avec les informations augmentées, directement, en effectuant des mouvements avec les mains qui correspondent à une forme de langage détecté et interprété par le système.



Figure 4: illustration du système WUW

Dans cet exemple, le système de RA est aussi mobile, mais cette application se distingue du premier exemple (BARS) par le dispositif de restitution (Projection) ainsi que par la nature des augmentations. En effet, dans le projet BARS, les éléments augmentés concernaient l'environnement distant de l'utilisateur (champ de bataille, bâtiment, etc.) alors qu'ici, les informations ne peuvent être projetées qu'à courte distance.

### **2.1.5 Conclusion**

Les différentes applications de RA présentées ici montrent la grande diversité de mise en œuvre de ce type d'interface Homme-machine. Les contextes d'application possibles sont très variés, et la RA ne semble pas être restreinte à seulement un type d'environnement. Que se soit en intérieur ou extérieur, en statique ou en usage dynamique, le potentiel de la RA semble pouvoir s'appliquer partout.

Même si le point commun entre toutes ces applications est le fait d'ajouter des éléments virtuels dans l'environnement perceptif réel d'un utilisateur, ces applications se différencient toutes selon leurs buts d'augmentation mais aussi selon les technologies employées. Comme nous le verrons dans la section suivante, il existe une grande variété de technologies pour mettre en œuvre le concept de RA selon le contexte d'application et les contraintes qui en découlent.

## 2.2 LES TECHNOLOGIES DE LA RA

Afin de pouvoir intégrer des éléments virtuels dans le champ visuel de l'utilisateur il existe un certain nombre de techniques qui peuvent fortement varier d'une application à une autre, comme le montre la section précédente. Cependant, deux sous-systèmes sont récurrents et indispensables dans tout système de RA.

Le premier concerne le restituteur, c'est-à-dire le dispositif qui permettra à l'utilisateur de percevoir les éléments virtuels superposé à l'environnement réel.

Le second composant fonctionnel indispensable concerne le recalage, c'est-à-dire le moyen de positionner correctement les éléments virtuels dans l'environnement réel perçu par l'utilisateur.

Comme pour la restitution, il existe plusieurs principes de recalage aux avantages et inconvénients différents. A l'heure actuelle, Il n'existe pas de solution idéale qui puisse convenir à toutes les situations. Le choix de ces deux sous-systèmes est conditionné par le contexte d'utilisation, c'est-à-dire par les besoins et contraintes de chaque application. Cette section présente un rapide tour d'horizon de ces différentes technologies utilisées dans les domaines d'application où la RA émerge.

### 2.2.1 Les dispositifs de restitution

Le type de restituteur est le premier critère de distinction des différentes applications de réalité augmentée. C'est, en effet, le composant impactant le plus l'usage, car il s'agit du dispositif qui sera l'interface entre l'utilisateur et les informations fournies par le système de RA.

#### 2.2.1.1 Les Head Mounted Display (HMD)

Un restituteur HMD (*Head Mounted Display* ou *Helmet Mounted Display*) est un dispositif de restitution d'images porté sur la tête de l'utilisateur. Il peut être monoculaire, bi-oculaire ou binoculaire suivant qu'il restitue une image sur un ou deux yeux. L'adjectif bi-oculaire caractérise les dispositifs munis de deux oculaires restituant rigoureusement la même image aux deux yeux. Les dispositifs binoculaires, quant à eux, renvoient l'image de la scène vue sous deux angles légèrement différents, ceci afin d'apporter une vision stéréoscopique et favoriser la perception naturelle du relief et des distances.

Les systèmes d'affichage HMD peuvent être classés en deux catégories:

- Ceux qui ne permettent pas de vision de l'environnement direct de l'utilisateur, sont classés dans la catégorie « Immersif ou semi-immersif ». Ces systèmes sont constitués d'écrans venant se placer à une courte distance des yeux et occultent ainsi plus ou moins le champ de vision du porteur.



Figure 5 : restituteur immersif binoculaire (à g.) et semi immersif monoculaire (à d.).

- Ceux qui permettent une vision directe de la scène, sur laquelle ils superposent des informations, seront qualifiés de « *see-through* ». On distingue ensuite les « *optical see-through* » (OST) des « *video see-through* » (VST). Les premiers permettent l'ajout d'informations sur une surface transparente, placée devant l'œil de l'utilisateur, lui permettant ainsi de voir à la fois son environnement et les informations augmentées affichées par le restituteur (voir Figure 6). Les VST restituent l'image de la scène filmée par une ou deux caméras en temps réel dans un restituteur immersif, en ajoutant au passage les éléments virtuels au flux vidéo restitué à l'utilisateur (voir Figure 7).

Les deux figures suivantes illustrent le principe de fonctionnement des restituteurs *see-through* :

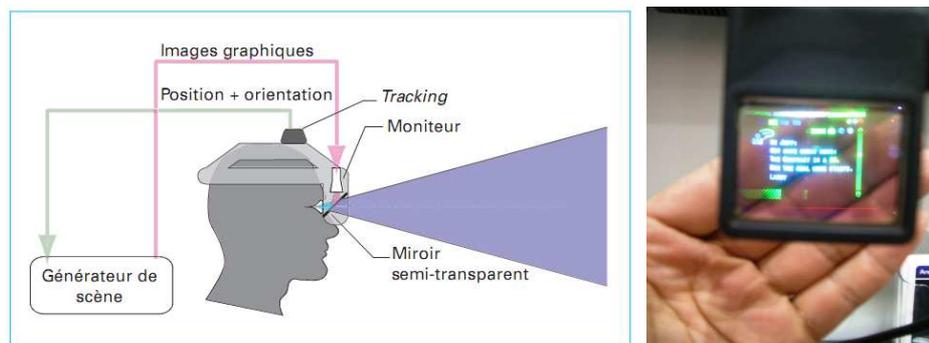


Figure 6 : restituteurs « *optical see-through* », principe et illustration

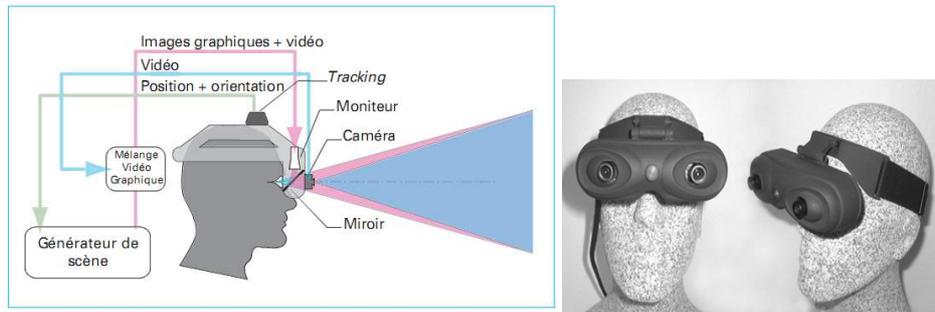


Figure 7 : restituteur « video see-through », principe et illustration.

Historiquement, ce sont ces types de restituteurs qui ont permis de faire émerger le domaine de la RA et la plupart des publications dans le domaine s'appuie sur ces dispositifs.

### 2.2.1.2 Les Hand Held Display (HHD)

La catégorie HHD (*Hand Held Display*) concerne les dispositifs de restitution que l'utilisateur tient à la main. C'est ce type de restituteur qui est le plus répandu dans les applications grand public grâce au succès et à la démocratisation des Smartphones et autres PDA qui comportent tous les composants nécessaires (Caméra, GPS, capteurs et puissance de calcul) pour la RA.

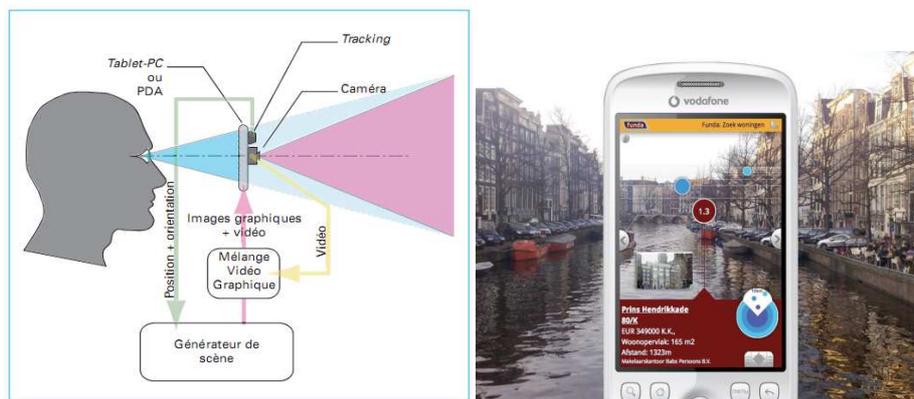


Figure 8: Principe d'un HHD (à g.) et Layar sur Smartphone (à D.).

La forte démocratisation et diffusion des Smartphones durant la dernière décennie offre une plateforme propice au développement du marché grand public de la RA.

### 2.2.1.3 Les Head-Up Display (HUD)

La technique *Head-Up Display* (HUD) consiste à projeter les éléments virtuels sur une surface semi-transparente devant le champ visuel de l'utilisateur tel qu'un pare-brise de voiture ou dans un cockpit d'avion.

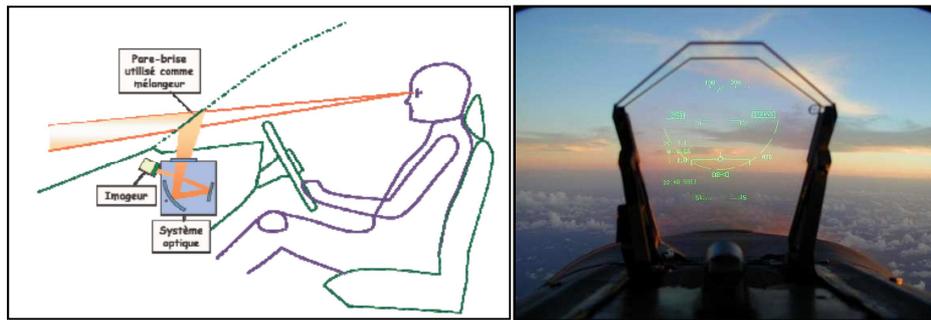


Figure 9: Principe d'un HUD dans une voiture (à g.) et dans un F18 (à d.).

Par définition, ce type de restituteur nécessite la présence d'un équipement tiers (en général un véhicule), ce qui permet de ne pas fixer le système sur l'utilisateur lui-même. L'inconvénient majeur des HUD est que le champ visuel augmenté (CVA) est particulièrement réduit et ne peut être déplacé par l'utilisateur pour explorer son environnement. Ce type de dispositif a historiquement vu le jour dans le domaine aéronautique et notamment militaire. Depuis quelques années, certains constructeurs automobiles (PSA et BMW entre autres) intègrent ce genre de dispositif dans leurs véhicules haut de gamme.

#### 2.2.1.4 Les Monitor-Based Displays (MBD)

Cette méthode (semi immersive) permet à l'utilisateur de percevoir le monde réel ainsi que les éléments virtuels sur un moniteur. La scène présentée est donc générée par un ordinateur ainsi que les éléments virtuels. L'utilisateur peut accessoirement porter des lunettes stéréoscopiques pour améliorer la perception de la profondeur.

La position des éléments virtuels dans l'espace augmenté est calculée à partir de la position du capteur situé à proximité de la caméra et non de la position de l'utilisateur. Ce type de restitution permet d'augmenter des environnements distants tels que ceux rencontrés dans les situations de téléopération ou télémanipulation (par exemple le projet SCS).

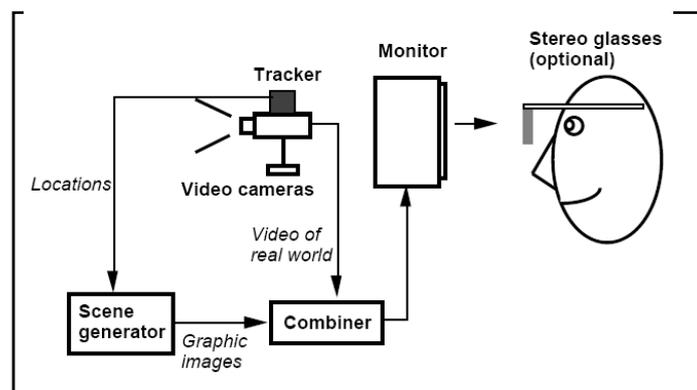


Figure 10: Principe de fonctionnement des MBD.

Ce type de dispositif est notamment utilisé dans les applications marketing de la RA car ne nécessite pas l'achat de matériel coûteux. En effet, un simple ordinateur de bureau équipé d'une webcam permet de mettre en œuvre l'application. De nombreuses entreprises se sont appuyé sur cette approche dans leur développement commercial avant de basculer progressivement vers l'usage de Smartphones.

### 2.2.1.5 La Spatially Augmented Reality (SAR)

Dans ce type de restitution, les éléments virtuels sont directement affichés sur l'environnement réel par l'emploi de un ou plusieurs vidéoprojecteurs. L'utilisateur a donc une perception directe des informations « augmentées » et de son environnement réel sans qu'il n'y ait de dispositif intermédiaire dans son champ visuel. Ce principe d'augmentation fourni des avantages multiples, tel que la non-intrusivité du système (pas d'équipement sur l'utilisateur), ainsi que la possibilité pour plusieurs personnes de visualiser simultanément la scène augmentée.



Figure 11: Illustration du bureau du futur (Raskar et al., 1998) (à g.) et Projection sur un véhicule (Volkswagen research group) (à d.).

Ce type de dispositif est typiquement utilisé dans certaines écoles où l'on parle alors de tableaux blancs interactifs. Ces systèmes sont assez coûteux et ne conviennent que dans des contextes d'usage statiques (pour la majorité). Plus récemment, ce concept a été appliqué dans le domaine industriel et notamment du design où les éléments virtuels (tel que la couleur ou les pièces non visibles d'une voiture) sont projetés directement sur une maquette réelle manipulable par l'équipe de conception.

## 2.2.2 Le recalage

Afin de pouvoir afficher des éléments virtuels correctement positionnés dans l'environnement réel, un système de RA doit être capable de savoir où se situe l'utilisateur dans le monde physique et dans quelle direction il regarde.

En d'autres termes, le système de RA doit être capable (idéalement) de déterminer en temps réel la pose (position et orientation) de l'utilisateur dans les six degrés de liberté : les trois dimensions (longitude, latitude et altitude) et les rotations (tangage, roulis et lacet). Pour cela, le système doit être équipé de capteurs permettant de recueillir des informations sur la pose de l'utilisateur dans l'environnement, ainsi que d'une chaîne de traitement logicielle permettant de superposer précisément le monde virtuel et ses entités sur le monde réel. De là, tout changement de la position ou de l'orientation du point de vue de l'utilisateur dans le monde réel sera aussi interprété dans le monde virtuel et le système sera donc capable d'actualiser, de façon correcte, la position des éléments virtuels sur le dispositif de restitution.

Dans la suite de ce document, le terme de recalage englobera l'ensemble de cette chaîne (de l'acquisition des capteurs jusqu'à la mise à jour de la position réaliste des éléments à afficher). Dans la littérature, le recalage suscite encore beaucoup de questionnement et reste encore aujourd'hui l'un des verrous techniques majeurs de la RA. Ces problématiques de géolocalisation et de suivi (*tracking*) de l'environnement ou d'un utilisateur n'étant pas spécifiques qu'à la RA, de nombreuses approches différentes ont été publiées, avec leurs avantages et inconvénients propres. En effet, selon le domaine de recherche ou le contexte d'application, certaines technologies sous-jacentes au recalage sont adaptées à un usage particulier et sont parfois inadéquates pour d'autres contextes.

Dans cette section, nous présenterons un rapide tour d'horizon des différentes techniques de recalage actuellement utilisées dans le domaine de la RA. Ces approches seront organisées en trois grandes catégories selon le type de méthode employée (physique, optique, hybride ou autres).

### **2.2.2.1 Les Méthodes basées physique**

Ces techniques s'appuient sur l'utilisation des données issues d'un GPS (*global positioning system*) et/ou de capteurs inertiels (accéléromètres, compas magnétiques, gyroscopes). Ces capteurs sont généralement utilisés conjointement car le premier type permet d'obtenir une position absolue dans l'environnement réel, alors que le deuxième type permet, quant à lui, d'obtenir l'orientation du porteur. Ce type de méthode est relativement simple et éprouvé maintenant et ces types de capteurs sont très répandus dans les équipements grand public (GPS voitures, Smartphones, etc.).

L'avantage principal de ce type d'approches est qu'elles ne nécessitent pas de connaissance a priori de l'environnement (modèle 3D ou autres) pour fonctionner. Seules les positions absolues des entités virtuelles dans le repère du monde réel sont requises pour déterminer un lien relatif entre l'utilisateur et ces dernières. Ces méthodes sont donc les plus simples à mettre en œuvre et c'est d'ailleurs avec cette approche que s'est développé Layar (voir à ce propos la Figure 8), le navigateur de RA le plus répandu sur Smartphone aujourd'hui.

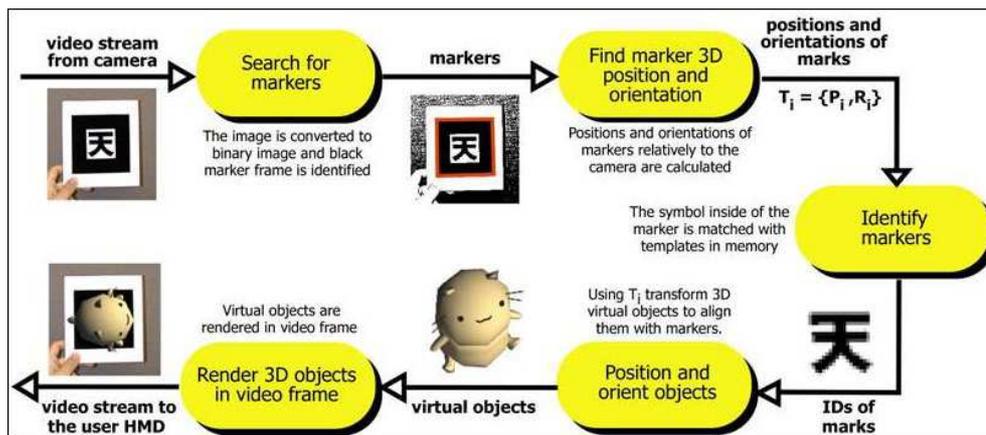
Cependant, ce type d'approche soulève plusieurs contraintes pouvant être rédhibitoires dans certains contextes d'usage. Tout d'abord, la précision globale de ce type de technique est limitée par la précision des capteurs employés. Par exemple la précision d'un GPS est d'environ 10 à 15 mètres et les capteurs inertiels ont le défaut de dériver dans le temps. De plus, cette approche n'est possible qu'en extérieur, car la localisation GPS est interrompue à l'intérieur des bâtiments.

En résumé, cette approche simple et peu coûteuse est facile à mettre en œuvre sur des applications de RA grand public en extérieur ne nécessitant pas une précision de recalage trop importante, ni d'usage en intérieur. Dans les autres cas, cette solution montrera vite ses limites.

### **2.2.2.2 Les méthodes basées optique**

Ces techniques reposent sur l'emploi d'une ou plusieurs caméras pour détecter et reconnaître des éléments physiques connus dans l'environnement réel de l'utilisateur. Il existe deux approches distinctes se différenciant par l'usage ou non de marqueurs spécifiques dans l'environnement.

La reconnaissance de marqueurs fut un levier important de développement de la RA durant la fin des années 1990. En effet, avec l'apparition de la plateforme de développement ARToolKit (Billinghurst, Bee, Bowskill, & Kato, 1999), de nombreuses équipes de recherche se sont appuyées sur cet outil pour développer leurs dispositifs de RA.



Figure

12 : Principe du recalage par reconnaissance de marqueur (ARToolKit).

Comme l'explique la figure précédente, le principe du recalage par marqueur repose sur la reconnaissance visuelle d'un élément dans la scène. Ce marqueur étant connu (taille, forme, etc.), le système est capable de déterminer sa position et son orientation dans le champ visuel et donc d'afficher un objet virtuel en cohérence avec ces informations.

Cette technique est maintenant maîtrisée et propose un niveau de robustesse et de précision suffisant pour de nombreuses applications de bureau. A l'instar de l'approche précédente, cette technique ne requiert aucune connaissance a priori du monde réel à l'exception des marqueurs à détecter.

Cette approche est particulièrement efficace à courte distance (<3m) mais n'est pas adaptée pour une utilisation à plus longue distance. La principale limitation vient de la qualité de résolution des caméras ne permettant pas de détecter et reconnaître le marqueur au-delà d'une certaine distance (en dessous d'une certaine taille sur l'image). De plus, cette technique ne peut être appliquée dans certains contextes où la disposition de marqueur dans l'environnement réel est impossible.

La deuxième catégorie de technique basée vision permet justement le recalage sans utilisation de marqueur (*markerless*). Dans ce type d'approche, le principe est assez similaire à la reconnaissance de marqueurs mais ici, ce sont directement des éléments physiques naturellement présents dans l'environnement qui sont détectés. En effet, les techniques *markerless* repose sur la reconnaissance et le suivi de point d'intérêt naturel (*natural features*) dans le champ de vision de l'utilisateur dont la position 3D est connue dans l'environnement virtuel. Ainsi, les déplacements de ces points entre chaque image permettent de détecter les mouvements de l'utilisateur et donc de rafraîchir l'affichage des informations augmentées en conséquence.

Ce type de technique peut s'appuyer sur la comparaison avec un modèle 3D de l'environnement, ce qui nécessitera de le constituer avant l'utilisation du système. Ce type de méthode semble être très prometteuse pour l'avenir de la RA, car elle permet un recalage très précis, et ce, quel que soit le contexte environnemental (intérieur, extérieur, courte ou longue distance). De plus,

contrairement à l'approche précédente, elle ne nécessite pas la disposition de marqueur dans l'environnement et donc elle peut être employée dans de plus nombreuses applications.

Cependant, ces techniques sont les plus coûteuses d'un point de vue de la puissance de calcul et sont très sensibles à la qualité de l'acquisition vidéo de la scène. En effet, ce type de méthode peut être impacté par la luminosité, les reflets, les ombrages dans la scène et même les déplacements rapides de l'utilisateur (flou de bougé). Dans ces situations, la détection et le suivi des points d'intérêts peuvent être dégradés voire impossibles. Par conséquent, les contextes d'application nécessitant une forte mobilité de l'utilisateur ou un environnement lumineux ambiant difficile limiteront les performances de ce type de technique de recalage.

Que se soit avec ou sans marqueur, nous trouvons dans la littérature des exemples de technique basée sur l'utilisation des Infrarouges (IR). Dans le premier cas, l'objet à détecter est équipé de petites sphères réfléchissant fortement les IR (ou des LED IR) et permettant donc à une paire de caméra IR de détecter leur position dans l'environnement.

Dans le deuxième cas, un projecteur IR affiche un pattern invisible à l'œil nu mais détectable par caméra IR. Le principe est donc similaire à l'approche présentée ci-avant (i.e ARToolKit)

### **2.2.2.3 Les méthodes hybrides**

Afin de limiter les inconvénients majeurs respectifs des techniques basées physiques et vision, une troisième catégorie de méthode propose une hybridation de ces approches (inertiel et vision). Ainsi, les problèmes de dérive issus des capteurs inertiels sont compensés par la vision et les pertes de *tracking* visuels sont compensées par les données inertielles de déplacement.

### **2.2.2.4 Les autres méthodes**

Au-delà des principales méthodes décrites précédemment, on trouve dans la littérature d'autres techniques de recalage moins répandues. Par exemple, dans le premier système de RA développé par l'équipe de Sutherland (1963), la position et l'orientation du HMD étaient recueillies par un bras mécanique fixé au plafond. Cette technique très spécifique fut développée en l'absence d'autres techniques de recalage disponibles à cette époque.

Par ailleurs, il existe aussi des techniques basées sur la détection de marqueurs RFID (*Radio Frequency Identification*) positionnés dans l'environnement. Cette approche, dont le principe est similaire à celui des marqueurs visuels, nécessite donc de préparer l'environnement à augmenter. Mais, a contrario des méthodes basées vision, la reconnaissance de marqueur RFID n'est pas sensible à l'environnement lumineux de l'utilisateur et peut donc fonctionner en toutes situations (forte mobilité ou usage nocturne).

### **2.2.2.5 Conclusion**

A l'instar des reconstituteurs, les techniques de recalages sont très variées et dépendent du contexte d'application. Il n'existe pas actuellement de solution idéale fonctionnant dans toutes les situations, mais les approches hybrides semblent fournir de nombreux avantages potentiels. Cette technique constituera certainement l'avenir de la RA pour les utilisations en extérieur et en mobilité.

## 2.3 DEFINITIONS ET TAXONOMIES DE LA RA

Comme le montre la section précédente, il existe une grande diversité dans la mise en œuvre de la réalité augmentée. Du choix des briques technologiques constituantes jusqu'au domaine d'application, en passant par le type d'éléments augmentés, chaque application semble différente. Ce caractère polymorphe exprime clairement que la RA ne peut être réduite à une simple technologie innovante, mais qu'il s'agit d'un nouveau paradigme d'interaction Homme-Machine plus large et, d'une certaine manière, indépendant des technologies sous-jacentes.

À partir de ce constat, il devient nécessaire de définir ce qu'est la RA afin de pouvoir différencier les systèmes et donc améliorer la compréhension de la spécificité de ces types d'IHM ainsi que de leurs problématiques intrinsèques. Parmi les premières définitions de celle-ci, on peut en distinguer trois principales. La première, considère que la RA désigne les systèmes de restitution tête haute (HUD ou HMD) permettant l'affichage d'élément virtuel en superposition de la vue directe de l'environnement (*see-through*). (Azuma, R. T., Barfield, & Caudell, 2001). Une deuxième définition, plus large, ne restreint pas l'emploi d'un restituteur tête haute, mais considère comme étant de la RA tout système augmentant l'environnement réel par l'ajout d'éléments virtuels (Milgram & Kishino, 1994). Enfin, une troisième définition formulée par Azuma, R. (1997) considère la RA comme une variation de la réalité virtuelle (RV) ayant 3 propriétés spécifiques ; 1) combiner réel et virtuel, 2) Interactive en temps réel, 3) recaler en 3D. Cette dernière définition, bien que plus restrictive que les précédentes, est encore trop vaste et englobe par sa première propriété tous les systèmes de virtualité augmentée et, plus largement, le domaine de la réalité Mixte tel que décrit par le continuum de Milgram et Kishino (1994).

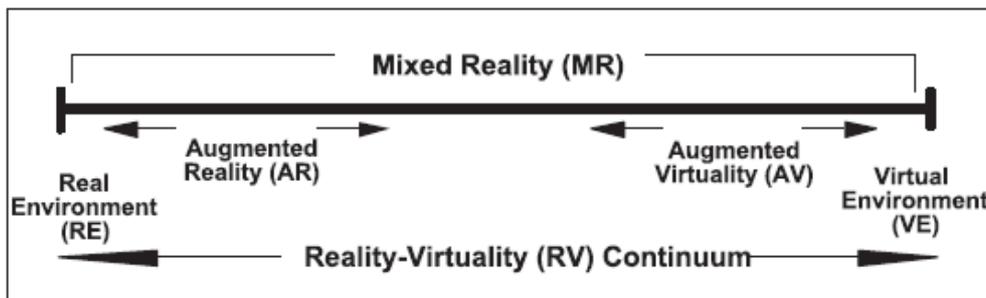


Figure 13: Continuum Réalité-Virtualité de Milgram.

De plus, même si, à l'heure actuelle, il n'y a pas de définition formelle et partagée par toute la communauté, il semble tout de même possible de décider si une application s'appuie sur une forme de RA ou non. Cela sous-entend qu'il existe implicitement un certain nombre de critères permettant de distinguer une IHM de RA des autres. A partir de ces deux constats, de nombreux auteurs ont proposé des taxonomies de la RA permettant de catégoriser les différentes applications existantes ou à venir. Ces classifications s'appuient généralement sur plusieurs critères afin d'organiser les systèmes de RA et c'est précisément la nature de ces critères qui distingue les différentes taxonomies. Dans cette

section, nous présenterons les principales classifications proposées dans la littérature afin d'en extraire les forces et faiblesses, mais aussi les points communs. Ainsi, en identifiant les régularités de ces taxonomies, cela permettra potentiellement de cerner les spécificités de tout système de RA et donc d'isoler ce ou ces éléments qui distinguent la RA des autres types d'interfaces homme-machine.

### **2.3.1 La taxonomie de Milgram et al (1994).**

Parmi les premières taxonomies, on trouve celle de (Milgram & Kishino, 1994; Milgram, Takemura, Utsumi, & Kishino, 1994) qui proposent de classer les systèmes de RM selon : 1) le type de restituteur employé mais aussi selon 2) le type d'environnement mixte. Ces auteurs considèrent qu'il existe 2 grandes catégories de restituteur, ceux avec une capacité « *see-through* » et ceux utilisant des moniteurs. Des nuances existent entre ces deux catégories conduisant les auteurs à identifier 7 types de restituteur de réalités mixtes :

1. Restituteur de RA basé écran (non-immersif) dans lesquels sont superposés des éléments générés par ordinateur,
2. HMD de RA basé écran (immersif),
3. HMD de RA *optical see-through* (O-ST),
4. HMD de RA *vidéo see-through* (V-ST),
5. Restituteur de Virtualité Augmentée (VA) basé moniteur avec un environnement virtuel et l'incrustation de vidéos réelles,
6. Restituteur immersif ou semi-immersif de VA avec incrustation de vidéos réelles dans un environnement virtuel,
7. Système de VA semi-immersif permettant l'interaction avec des objets réels (mains de l'utilisateur par ex.).

Class of MR System	Real (R) or CG world?	Direct (D) or Scanned (S) view of substrate ?	Exocentric (EX) or Egocentric (EG) Reference?	Conformal Mapping (1:1), or not (1:k) ?
1. Monitor-based video, with CG overlays	R	S	EX	1:k
2. HMD-based video, with CG overlays	R	S	EG	1:k
3. HMD-based optical ST, with CG overlays	R	D	EG	1:1
4. HMD-based video ST, with CG overlays	R	S	EG	1:1
5. Monitor/CG-world, with video overlays	CG	S	EX	1:k
6. HMD/CG-world, with video overlays	CG	S	EG	1:k
7. CG-based world, with real object intervention	CG	D, S	EG	1:1

Figure 14: Comparaison des restitueteurs de RM selon (Milgram et al., 1994).

Enfin, Milgram *et al.* identifient 4 critères supplémentaires pour distinguer les systèmes de RM (voir Figure 14). Le premier (R pour réel ou CG pour *Computer Graphic, soit virtuel*) désigne la nature de l'environnement d'arrière plan perçu et constitue, d'une certaine manière, le continuum réalité-virtualité. Le deuxième critère (S ou D) désigne la façon dont est perçu l'environnement par l'utilisateur (vue directe D, ou numérisée S). Le troisième (EX ou EG) désigne la position du point de vue sur l'environnement, c'est-à-dire égocentrique dans le cas où le point de vue est identique à celui de l'utilisateur, ou exocentrique s'il y a une modification de ce point de vue. Enfin, le 4eme critère désigne si la transformation est conforme au point de vue de l'utilisateur ou non.

A partir de la combinaison de l'ensemble de ces éléments discriminants, les auteurs ont construit trois dimensions principales et proposent de classifier les environnements mixtes sur cette base.

- Le premier (*Extent of World knowledge, EWK*) désigne le niveau de connaissance qu'a le système sur les objets et le « monde » dans lequel ils sont affichés.

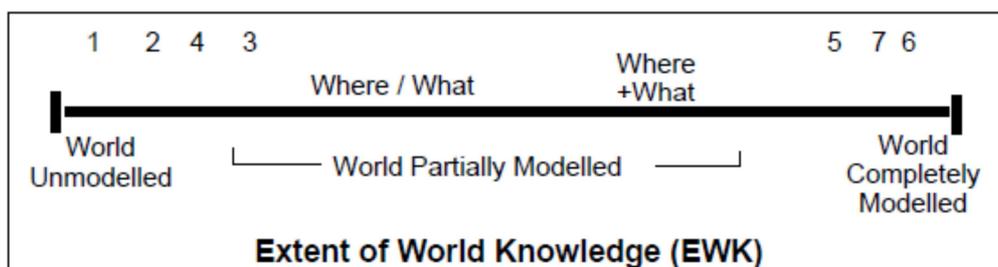


Figure 15: Continuum EWK selon Milgram et al. (1994).

- Le deuxième critère (*Reproduction fidelity*, RF) désigne la qualité graphique ou niveau de réalisme des éléments affichés. Il s'agit aussi bien des objets intégrés que de l'environnement lui-même.

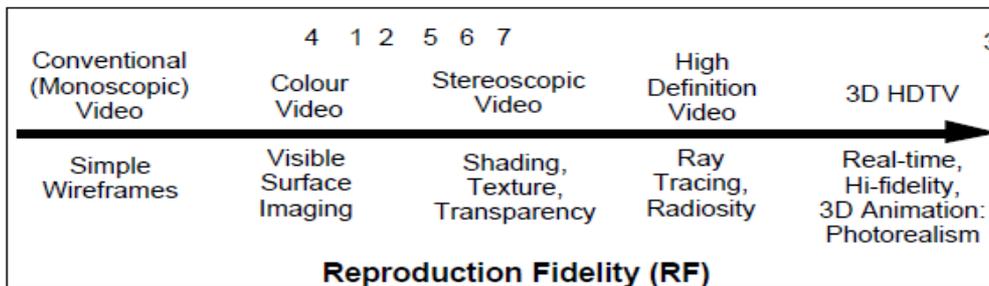


Figure 16: Continuum RF selon Milgram et al. (1994).

- Enfin, le dernier critère (*Extent of presence metaphor*, EPM) désigne le niveau d'immersion, c'est-à-dire le sentiment de présence de l'utilisateur dans l'environnement affiché.

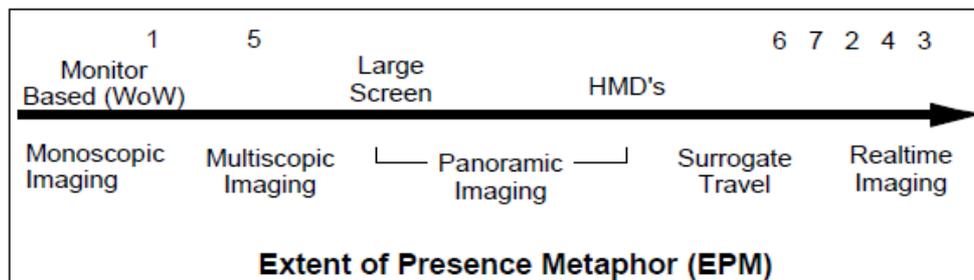


Figure 17: Continuum EPM selon Milgram et al. (1994).

Ces travaux proposent un cadre de recherche permettant de positionner les systèmes de RM parmi les 7 classes de restituteurs mais aussi dans une taxonomie tridimensionnelle formée par les 3 critères précédemment décrits.

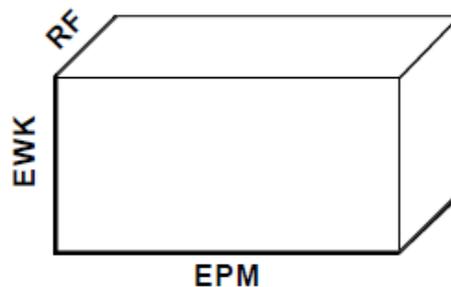


Figure 18: Classification tridimensionnelle des systèmes de RM selon Milgram et al. (1994).

Cette taxonomie est particulièrement intéressante car elle fut la première à positionner la RA par rapport à la RV et à la VA. De plus, les auteurs introduisent la notion de RM qui sera massivement reprise dans la littérature. Cependant, elle ne permet que très peu de classifier les différents systèmes de RA du point de vue du contenu informationnel et interactif.

Cette taxonomie se centre principalement sur la catégorisation du type de restituteur employé et sur ses capacités d'affichage. En outre, la liste des 7 types de restituteurs décrits reste lacunaire, comme le précisent les auteurs. En effet, ni les restituteurs de type HHD (smartphone, Tablet, etc.) ni les techniques basées projections ne sont intégrés dans cette liste.

### 2.3.2 La taxonomie de Fuchs et al. (2010)

Plus récemment, Fuchs, Hugues et Nannipieri (2010) proposent eux aussi une taxonomie ainsi qu'une définition originale du concept de RA. Tout d'abord, les auteurs ont questionné la pertinence du terme de « réalité augmentée » pour le dériver vers la notion de perception augmentée. Selon eux, la réalité en tant que telle, ne peut être augmentée, mais que c'est la perception de cette réalité qui peut être augmentée. Ainsi, les systèmes de RA sont des dispositifs techniques qui modifient notre couplage sensori-moteur avec notre environnement afin de nous fournir une meilleure maîtrise du réel. Cette augmentation de la quantité d'information modifie notre « espace perceptif » et donc notre capacité d'action dans l'environnement. Cette notion d'objectif d'action est centrale dans l'approche de Fuchs, qui considère que c'est un élément déterminant dans la classification des systèmes mixtes. En effet, selon ces auteurs, un système de RA peut répondre à deux objectifs distincts :

- Favoriser la compréhension et la maîtrise du réel, donc **augmenter la perception**.
- Proposer un « **environnement imaginaire** » sans exigence pratique ni informative.

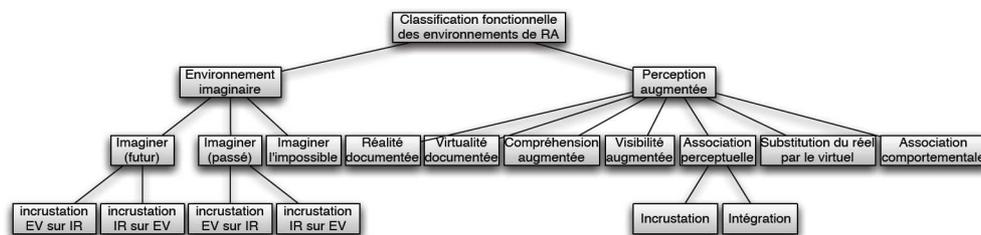


Figure 19: Taxonomie de Fuchs et al. (2010).

La distinction importante entre ces deux types de RA est la capacité ou non de s'affranchir de la localisation spatio-temporelle des éléments virtuels (EV) dans l'environnement réel. Dans le cas de la perception augmentée, l'interaction est inscrite dans le présent et dans la réalité de l'activité de l'utilisateur, ce qui n'est pas le cas des « environnements imaginaires ». Enfin, un second point particulièrement intéressant de cette taxonomie concerne le sous niveau, côté perception augmentée, qui insiste sur la distinction entre incrustation et intégration des EV. Au-delà des défis techniques inhérents à la gestion de l'occlusion, l'intégration complète d'un EV dans l'environnement réel contribue à la constitution d'un espace perceptif cohérent et donc à une fusion harmonieuse des mondes réel et virtuel.

### 2.3.3 La taxonomie de Normand et al. (2012)

A l'instar de la taxonomie précédente, Normand et Moreau (2012); (Normand, Servières, & Moreau, 2012) ont aussi considéré les propriétés spatio-temporelles des éléments virtuels comme un aspect significatif et discriminant des environnements augmentés. Ils proposent une taxonomie basée sur les quatre axes suivants :

- Le **Tracking**, qui se réfère au nombre de degrés de liberté requis par l'application.
- Le **type d'augmentation**, désigne s'il s'agit d'une augmentation directe du monde visible par tou, ou si elle nécessite une médiation par un dispositif spécifique.
- La **temporalité**, désigne la localisation temporelle (passé, présent, futur, imaginaire) de l'application.
- Les **modalités de restitutions**, s'intéressent aux autres modalités sensorielles qui peuvent être mises en jeu dans une application de RA et particulièrement les cas de multimodalités.

Le premier axe de cette taxonomie constitue son originalité. La notion de tracking employée ici est à prendre au sens large de suivi du point de vue de l'utilisateur vis-à-vis de l'environnement augmenté. Ce critère peut prendre quatre modalités (0D, 2D, 2D+ $\theta$  ou 6D) qui se réfèrent chacune à un type de relation spatiale entre l'utilisateur et les éléments virtuels et/ou l'environnement réel. Plus le nombre de degrés de liberté est élevé, plus les déplacements de l'utilisateur auront un impact important sur l'environnement augmenté et devront donc être pris en compte par le système de RA.

Par conséquent, on observe une progression dans la complexité et dans le niveau de précision attendu en termes de tracking en fonction du nombre de degré de liberté attendu, ce que les auteurs résument ainsi dans le tableau suivant :

DOF	Precision classes	Typical Update Rates
0D	N.A	N.A
2D	~10m	~1Hz
2D+ $\theta$	~10m	~1 – 10 Hz
6D	$\leq 1$ cm	~10 – 100 Hz

Tableau 1: Résumé des exigences de précision selon les degrés de liberté (Normand & Moreau, 2012).

Le deuxième axe de cette taxonomie permet de distinguer d'une part, les systèmes de RA permettant une augmentation directe de l'environnement (par projection ou SAR, voir 2.2.1.5) et, d'autre part, de ceux impliquant l'utilisation d'un dispositif intercalant les éléments virtuels entre l'utilisateur et sa perception du monde réel (tels que les techniques de restitution basées HMD ou HHD). Dans cette catégorie, les auteurs distinguent deux sous-classes avec d'un côté les restituteurs *Optical see-through* et, de l'autre, les restituteurs *video see-through*.

Le troisième axe de cette taxonomie concerne la temporalité des augmentations, c'est-à-dire si le système permet d'afficher des informations inscrites dans le passé (site archéologique), le présent, le futur (construction d'un bâtiment à venir) ou l'imaginaire. La plupart des applications de RA d'aide à la décision s'inscrivent dans le présent en fournissant à l'utilisateur des informations pertinentes et corrélées à son contexte actuel d'utilisation. En outre, la plupart des applications de RA orientées loisir ou jeu interactif sont plutôt inscrites dans l'imaginaire en permettant à l'utilisateur de percevoir des personnages, objets ou environnements impossibles et décorrélés de la réalité.

Enfin, le dernier axe de cette taxonomie s'intéresse aux autres modalités sensorielles pouvant être mises en jeu dans un système de RA. A l'instar du visuel, les auteurs proposent une approche similaire pour l'haptique et l'auditif, basée sur le nombre de degrés de liberté. Cependant, cet axe est plutôt optionnel dans le sens où la multimodalité ne concerne pas nécessairement tous les systèmes de RA.

En résumé, cette taxonomie est particulièrement intéressante car elle permet de classer les systèmes de RA en considérant avant tout la caractéristique essentielle, précédemment identifiée, qui concerne le lien spatio-temporel entre l'utilisateur et les éléments virtuels. De plus, cette approche prend en compte aussi les aspects technologiques des systèmes de RA en différenciant plusieurs modes de restitution et de tracking et ce sont justement les deux principales briques technologiques constitutives de tout système de RA.

### 2.3.4 La taxonomie de Feiner et al. (1993)

Feiner, MacIntyre, Haupt et Solomon (1993) présentent un prototype de RA permettant d'afficher des éléments virtuels dans trois types de « fenêtres ». Il ne s'agit pas d'une taxonomie à proprement parler, mais le concept présenté ici semble pouvoir permettre de discriminer différents types d'application de RA. Les auteurs décrivent un système original permettant l'affichage d'information directement dans l'environnement réel d'un utilisateur de trois manières différentes. Chaque classe de fenêtre désigne un endroit où seront affichés les éléments virtuels relativement à l'utilisateur.

La première classe, nommée ***Display-fixed windows***, consiste à afficher les éléments virtuels de façon statique sur le restituteur (un HMD dans le cas présent). Ainsi, les informations affichées sont visibles quelle que soit l'orientation de la tête de l'utilisateur. Les éléments virtuels ne sont donc pas associés à une localisation précise dans l'environnement réel.

La seconde classe, nommée ***Surround-fixed windows***, consiste en une sphère virtuelle autour de l'utilisateur sur laquelle peuvent s'afficher les informations. Selon l'orientation de la tête de l'utilisateur, les fenêtres peuvent être visibles ou non. Dans ce type d'affichage, seulement deux rotations de la tête, *Pitch et yaw*, (ou tangage et lacet en français) sont prises en compte.

Enfin, la classe nommée ***World-fixed windows***, désigne l'affichage d'éléments virtuels localisés dans l'environnement réel de l'utilisateur ou sur un objet. Dans ce cas de figure, l'orientation et la position de la tête de l'utilisateur sont pris en compte pour gérer l'affichage correct de la fenêtre.

Même si ce n'était pas l'objectif premier des auteurs, cet article met en évidence et de façon concrète, qu'il existe plusieurs types de RA se distinguant par la localisation spatiale des éléments virtuels. La distinction entre ces différentes « fenêtres » peut aussi s'exprimer en terme de nombre de degrés de liberté nécessaires pour générer l'interaction. En ce sens, ces travaux rejoignent ceux de Normand *et al.*, présentés précédemment. Cependant, le critère du type de fenêtre employé n'est pas assez discriminant pour constituer à lui seul une taxonomie des différents systèmes de RA.

### 2.3.5 Synthèse sur les taxonomies de la RA

Ce rapide tour d'horizon des différentes définitions et taxonomies des systèmes de RA permet de dégager quelques originalités ou tendances fortes quant à la formulation d'une définition et d'une classification formelle de la RA.

Malgré les différents facteurs ou critères employés dans ces taxonomies, nous pouvons identifier deux points majeurs récurrents dans la plupart de ces dernières : le type de restitution d'une part et la relation spatio-temporelle entre l'utilisateur et les éléments augmentés d'autre part.

Ce premier critère permet de classer assez simplement les différents systèmes de RA sur la base du type de restituteur employé. On observe une certaine cohérence dans la littérature, les auteurs emploient des désignations communes pour ces différents dispositifs (immersif, *see-through*, HMD, etc.). Cependant, il n'existe encore aucune taxonomie permettant d'intégrer tous les dispositifs de restitution possibles ni de proposer de nouveau type de restituteur.

Le deuxième aspect (relation spatio-temporelle) est abordé de façon très variée dans ces taxonomies. Les critères employés pour le formaliser divergent fortement d'une classification à une autre. Ce point est moins clair et direct que le précédent et nécessite encore d'être approfondi par la communauté, car il constitue, pour une bonne partie, la spécificité de la réalité augmentée.

L'approche de Fuchs et al. (2010) en est un exemple essentiel. En effet, en considérant non plus la « réalité » augmentée mais la « perception » augmentée, le débat peut être abordé sous un autre angle. Ce léger décalage permet de s'abstenir de rentrer dans l'épineux sujet de définition de la réalité et de son objectivité. La problématique recentre ainsi la question sur comment nous percevons et comment cette perception peut-elle être augmentée ? La section suivante présente une analyse plus précise de la relation entre l'utilisateur et ces environnements augmentés, sous l'angle de la perception et plus précisément à travers la notion d'espace perceptif.

## 2.4 DE LA RA AUX ESPACES PERCEPTIFS AUGMENTES

### 2.4.1 Définition d'un espace perceptif

L'espace dans lequel nous vivons nous apparaît en trois dimensions spatiales ainsi qu'une 4<sup>ème</sup> dimension constituée par la temporalité. Cependant, si l'on considère l'ensemble de nos capteurs perceptifs, par exemple chaque champ récepteur sur la rétine ou chaque capteur de pression cutané, l'espace (au sens mathématique du terme) sensoriel possède beaucoup plus de dimension. Cela implique que la perception unifiée et continue que l'on a de notre environnement est le produit d'une intégration et d'une reconstruction subjective d'un espace en 3+1 dimensions. Ce caractère intégrateur (spatial et temporel) de notre système perceptif est, en outre, mis en évidence par les lois de la gestalt (Rosenthal & Visetti, 1999) qui proposent aussi une conception intégratrice de notre système visuel notamment. A partir de ces constats, on en vient à la conclusion que notre système perceptif (quels que soient les processus neuropsychologiques mis en œuvre) a pour objectif de produire un « espace perceptif subjectif » à 3+1 dimensions nous permettant d'agir et d'évoluer dans l'environnement. Par extension, lorsque l'on parle de perception augmentée on désigne en fait un « espace perceptif augmenté » dans lequel sont perçus simultanément éléments réels et virtuels assemblés dans un tout cohérent.

### 2.4.2 Élaboration d'un espace perceptif augmenté

La constitution d'un espace perceptif homogène est le produit de processus inductifs complexes reposant sur des règles d'association. Pour qu'un élément virtuel puisse être intégré dans un espace perceptif, il doit respecter le même comportement spatial mais aussi temporel que les autres éléments de cet environnement. L'analyse des 3+1 dimensions d'un élément virtuel est donc essentielle pour l'intégration dans un espace perceptif. Ce principe peut expliquer certains problèmes perceptifs constatés dans la littérature. Par exemple, le phénomène de flottement ou *swimming effect* (Azuma, R. & Bishop, 1994; Rolland & Fuchs, 2000) provoqué par la latence de rafraîchissement (*Lag*) de la position d'un élément virtuel, peut supprimer la sensation que cet élément est fixé dans l'environnement réel. Dans ce cas de figure, l'utilisateur n'a plus la sensation de percevoir un seul environnement augmenté mais de voir une superposition de deux espaces, l'un, constitué par l'environnement réel et l'autre, par les éléments virtuels qui ont leurs propres règles et comportements distincts. Ce phénomène de flottement illustre bien que le respect de la temporalité est tout aussi important que les dimensions spatiales dans les processus d'association, et donc que le respect de l'ensemble des 3+1 dimensions est indispensable à l'élaboration d'un espace perceptif augmenté.

### 2.4.3 Pluralité des espaces perceptifs

Quand l'analyse d'un élément est ambiguë, c'est-à-dire pouvant être visuellement interprétée de deux façons possibles (voir figure 30), ce phénomène, nommé bistabilité perceptive, est étudié depuis longtemps (Necker, 1832). Notre système perceptif, étant exclusif, ne pourra intégrer que l'une des possibilités. Un même élément ne peut avoir simultanément deux états spatio-temporels dans un même espace perceptif. Dans un des cas, l'élément sera intégré dans un premier espace perceptif cohérent avec un ensemble d'autres éléments et, dans l'autre cas, notre système perceptif l'intégrera dans un autre espace disjoint du premier.

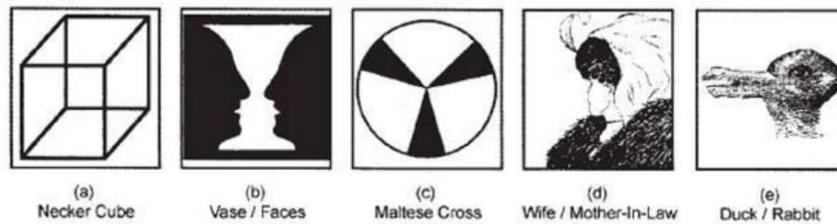


Figure 20: Exemple de bistabilités perceptives célèbres.

L'ensemble de ces éléments nous amène à constater que nous ne pouvons percevoir qu'un seul espace perceptif à la fois, mais il peut exister simultanément, dans l'environnement, plusieurs espaces perceptifs disjoints et nous pouvons, plus ou moins consciemment, basculer de l'un à l'autre. Cependant, le traitement des informations présentées dans un espace perceptif peut se faire au détriment d'un autre.

Ce phénomène de tunnel cognitif a été largement étudié dans la littérature et notamment par Yeh, Wickens et Seagull (1998) dans le cadre de la RA. Ces auteurs ont effectué une revue des études de ce phénomène dans le cadre de l'usage de HMD ou de HUD pour les pilotes de chasse. Les résultats de ces études montrent que le traitement des informations présentées dans le domaine proche (i.e fixées sur le HUD ou HMD) se faisait au détriment des informations du domaine lointain (l'environnement réel). Les auteurs ont proposé différentes hypothèses expliquant la cause de ce phénomène de tunnel cognitif. Par exemple, Levy, Foyle et McCann (1998) suggèrent que ce phénomène peut être le résultat des lois de la gestalt, et particulièrement des différences entre les deux domaines qui les empêchent d'être considérés comme un seul espace perceptif. Par ailleurs, Foyle, McCann, Sanford et Schwirzke (1993) considèrent que les difficultés de basculement attentionnel constatées peuvent être causées par le fait que les deux domaines s'appuient sur des référentiels différents (l'un egocentrique, l'autre exocentrique). Une des solutions envisagées est l'utilisation d'une « symbologie conforme » (*conformal symbology*) c'est-à-dire dont le comportement spatio-temporel est cohérent du référent réel. Il s'agit ici en fait d'éléments virtuels situés dans le référentiel monde (*world-fixed* selon la typologie de Feiner et al. (1993) et dont le comportement est similaire à celui de l'objet réel auquel ils sont associés. A l'instar du référentiel d'affichage des informations (*HMD-fixed* ou *world-fixed*) les auteurs ont aussi interrogé le rôle du type de restituteur sur ce phénomène de tunnel cognitif.

Malgré les avantages de la restitution monoculaire, il y a un risque important d'apparition de rivalité binoculaire. Le système visuel humain fonctionne à partir de la fusion de deux images (une provenant de chaque œil) en une perception cohérente et unifiée. Lorsque ce processus échoue, cela résulte en l'apparition d'une suppression monoculaire (une des deux images est ignorée) et l'image dominante perçue n'est issue que d'un œil et parfois de façon alternée sur le temps : c'est la rivalité binoculaire. Dans le cas de la RA, si l'image ignorée est celle de l'œil équipé du restituteur monoculaire, les éléments virtuels ne seront pas perçus et, par conséquent, la constitution d'un espace perceptif augmenté ne sera donc pas possible.

#### **2.4.4 Conclusion**

En synthèse, l'ensemble des éléments présentés dans cette section montrent que la simple superposition graphique d'élément virtuel sur un arrière plan visuel réel ne suffit pas à l'élaboration d'un espace perceptif unifié. En outre, l'utilisation d'une symbologie conforme réduit le phénomène de tunnel cognitif ce qui indique bien que le comportement spatio-temporel des éléments virtuels est essentiel dans les règles de constitution d'un espace perceptif augmenté cohérent. Par ailleurs, Le choix du type de restituteur peut influencer l'apparition du phénomène de rivalité binoculaire et donc impacter la constitution de l'espace perceptif. Cela rejoint l'idée que l'emploi d'un dispositif technique modifie notre couplage sensori-moteur d'où émerge la perception. Enfin, dernier point et non le moindre, les phénomènes de tunnel cognitif, bistabilité perceptive ou rivalité binoculaire indiquent tous la même chose : il peut y avoir simultanément plusieurs espaces perceptifs dans un même environnement et qui soient accessibles à la conscience de l'utilisateur grâce aux dispositifs de RA. En résumé, l'ensemble de ces observations permet de définir la RA comme désignant les dispositifs techniques permettant l'interaction avec plusieurs espaces perceptifs intégrant des éléments virtuels directement dans un environnement réel, sans nécessairement être fusionnés intégralement avec celui-ci. La section suivante va s'intéresser à l'évaluation ergonomique de la RA et à ses spécificités, au regard de la définition précédente. Cette dernière servira d'ailleurs de cadre d'analyse pour l'ensemble des travaux de thèse présentés ici.

### 3. RÉALITÉ AUGMENTÉE ET ERGONOMIE

---

Un défi important pour le domaine de l'ergonomie des systèmes interactifs et plus spécifiquement pour le domaine de l'ingénierie de l'utilisabilité est de concevoir des systèmes et technologies émergentes ainsi que leurs interfaces de façon à ce qu'ils soient adaptés à leurs utilisateurs, efficaces et cela, en l'absence de recommandations et de métaphores d'interaction bien établies. La réalité augmentée est un exemple de ces domaines émergents.

Dans ce contexte, les études avec utilisateurs (*user-based studies*) ou encore les études traditionnelles en ergonomie et en facteurs humains peuvent fournir des données et recommandations pertinentes pour la conception et l'évaluation des systèmes de RA. Bien que les travaux menés en RA datent de plus d'une quarantaine d'années, les évaluations documentées de ces systèmes sont beaucoup plus récentes.

Dans cette section, nous allons justement nous intéresser aux évaluations ergonomiques des systèmes de RA qui ont été publiées, identifier les méthodes employées ainsi que les aspects précis qui ont été abordés. Notre objectif ici est de déterminer les spécificités de l'évaluation ergonomique de la RA et d'identifier les problématiques qui lui sont spécifiques.

En effet, compte tenu des éléments présentés dans la section précédente, nous considérons la RA comme profondément différente des paradigmes d'interaction classiques (WIMP, tactile, etc.). Par conséquent, il semble raisonnable de penser que la RA doit donc soulever des problématiques ergonomiques également différentes des interfaces habituelles.

Sur la base de ce postulat, notre analyse sera orientée dans ce sens, c'est-à-dire dans l'identification et l'extraction de cette problématique spécifique (facteur X),

### 3.1 ÉTUDES ERGONOMIQUES DE LA RA : UNE PRATIQUE EMERGENTE

La réalité augmentée étant un domaine relativement jeune, les axes de recherche sont principalement orientés vers des études techno-centrées. Le développement de ce nouveau paradigme d'interaction suppose une amélioration de la maturité technologique des composants sous-jacents à sa mise en œuvre, il n'est donc pas étonnant de trouver une majorité de publications techniques plutôt que centrées utilisateur.

Récemment, Swan et Gabbard (2005) ont justement réalisé un état de l'art qui montre que, sur un total de 266 articles publiés sur le thème de la RA, seulement 38 (environ 14%) portaient sur des aspects de l'interaction homme-machine et seulement 21 (environ 8%) décrivaient une méthode d'évaluation utilisateur.

AR Publication Venue	Years	Total Publications	AR-Related Publications	HCI-Related Publications <sup>1</sup>	User-based Experiments <sup>2</sup>
ISMAR <sup>3</sup>	1998-2004	181	181	14	9
ISWC	1997-2004	170	28	12	5
IEEE Virtual Reality	1995-2004	301	24	3	3
Presence	1992-2004	452	33	9	4
<b>Total</b>		<b>1104</b>	<b>266</b>	<b>38</b>	<b>21</b>

Figure 21: Proportion des évaluations utilisateur en RA (issu de Swan II et Gabbard, 2005).

A partir de cette revue, les auteurs ont extrait de ces publications les objectifs d'évaluation et ont identifié trois catégories :

- **Perception** : Cette catégorie concerne les études visant à comprendre l'impact de la RA sur la perception et la cognition des utilisateurs dans des tâches de « bas niveau » ou tâches « élémentaires ».
- **Performances utilisateurs** : Il s'agit ici de mesurer les performances des utilisateurs de systèmes de RA, afin d'évaluer l'impact de ces systèmes sur des activités spécifiques. Les avantages et inconvénients des systèmes de RA sont ici comparés à des systèmes « traditionnels ».
- **Collaboration** : Ici, les études visent à analyser l'interaction et la communication entre plusieurs utilisateurs de systèmes de RA.

D'autres auteurs (Dünser, Grasset, & Billinghamurst, 2008) ont effectué un travail similaire. Leurs résultats sont cohérents avec les précédents : environ 7,8% seulement des publications sur la RA comportent des études utilisateurs. Cette faible proportion d'études ergonomiques des systèmes de RA peut s'expliquer en partie par le caractère novateur et émergent de ce domaine. Comme nous l'avons indiqué, les axes de recherches prioritaires concernent essentiellement les développements techniques.

En ce qui concerne la classification des articles, ces derniers auteurs reprennent les trois même catégories de Swan et Gabbard et rajoutent la catégorie « étude de l'utilisabilité des systèmes ». Il s'agit ici d'évaluations relativement proches de la seconde catégorie, sans nécessairement mesurer les performances utilisateurs, mais emploient d'autres moyens (évaluation par heuristiques, évaluation experte, analyse de tâche, méthode du *think aloud* ou du magicien d'OZ) pour identifier des problèmes d'utilisabilité des dispositifs de RA.

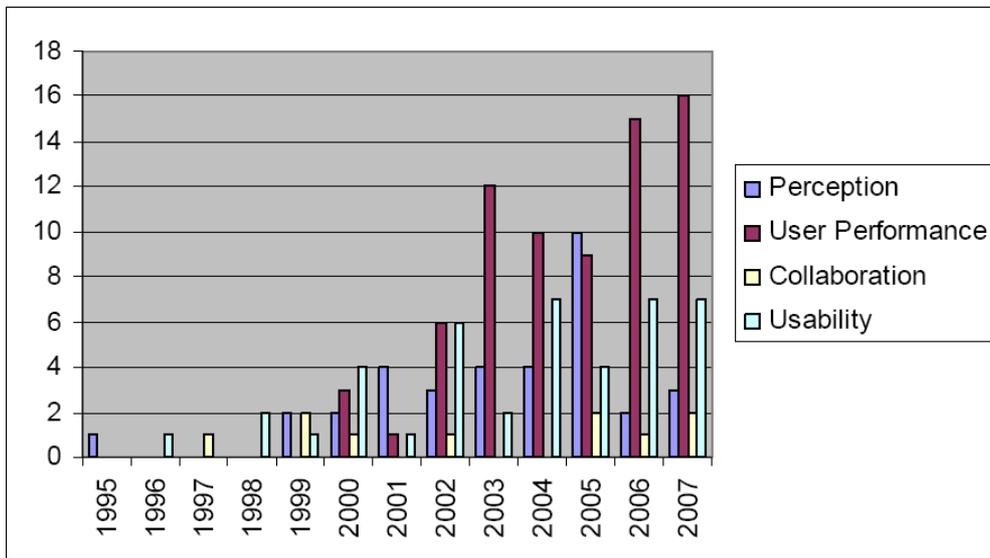


Figure 22: répartition des publications selon la catégorie d'étude (Dünser et al., 2008).

Les études ergonomiques nécessitent un certain niveau fonctionnel des systèmes de RA afin de pouvoir pratiquer des analyses pertinentes. Il n'est donc pas surprenant que ce nombre de publications soit en augmentation et suive donc l'évolution technologique des systèmes de RA. Car, même si la majorité des publications concerne principalement les verrous techniques liés aux technologies matérielles et logicielles des dispositifs, plus les systèmes de RA seront matures, plus l'expérience utilisateur, l'ergonomie et l'intérêt opérationnel deviendront des priorités pour la recherche.

De plus, ces publications ont été classées selon le type de méthode employée. Les auteurs ont considéré les cinq catégories présentées dans la figure suivante :

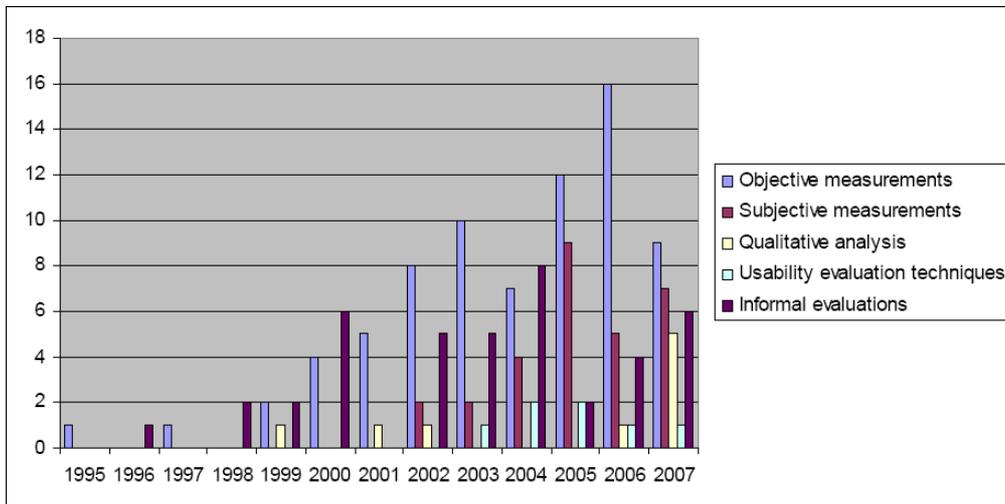


Figure 23: Répartition des études selon la méthode employée (Dünser et al., 2008).

Les auteurs ont répertorié 75 publications avec mesures objectives, 29 subjectives, 9 analyses qualitatives, 7 évaluations de l'utilisabilité et 41 études informelles. Les études avec mesures objectives sont les plus nombreuses car, d'une part, ce type de méthode est le plus efficace pour mesurer et quantifier un problème ergonomique et d'autre part, les études de mesure de performances utilisateurs (qui sont les plus simples à mettre en place et les plus pratiquées dans la littérature) font partie de cette catégorie. A l'inverse, les évaluations de l'utilisabilité (comprise ici comme méthodes d'inspection) sont les moins nombreuses. Cela s'explique par le fait que ce type de méthode, bien que rapide et simple à réaliser, nécessite une élaboration complexe. Il n'existe pas encore, à l'heure actuelle, d'heuristiques ou de critères ergonomiques « prêt à l'emploi » pour l'évaluation de système de RA.

A l'instar de ces publications, Bai et Blackwell (2012) ont aussi effectué, récemment, une revue de la littérature similaire mais seulement sur les publications de la conférence ISMAR (*the International symposium of mixed and augmented reality*). Cette conférence étant le principal événement international exclusivement consacré à la RA, les auteurs considèrent que les communications qui en découlent sont représentatives des axes de recherche de ce domaine.

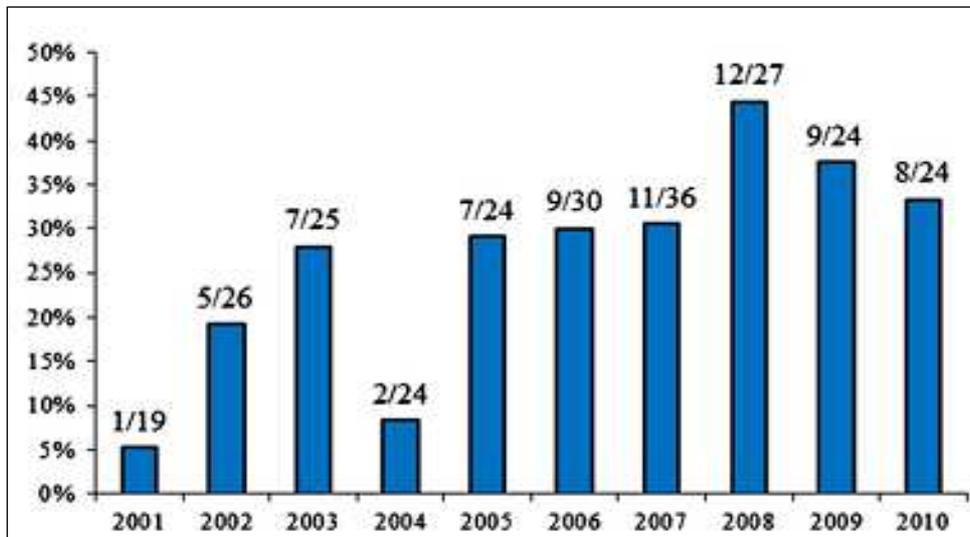


Figure 24 : nombre d'étude d'utilisabilité en RA publiées à ISMAR (Bai & Blackwell, 2012).

Comme le montre la figure précédente, les auteurs constatent les mêmes tendances identifiées précédemment, les études d'utilisabilité sont minoritaires mais en progression au cours des années.

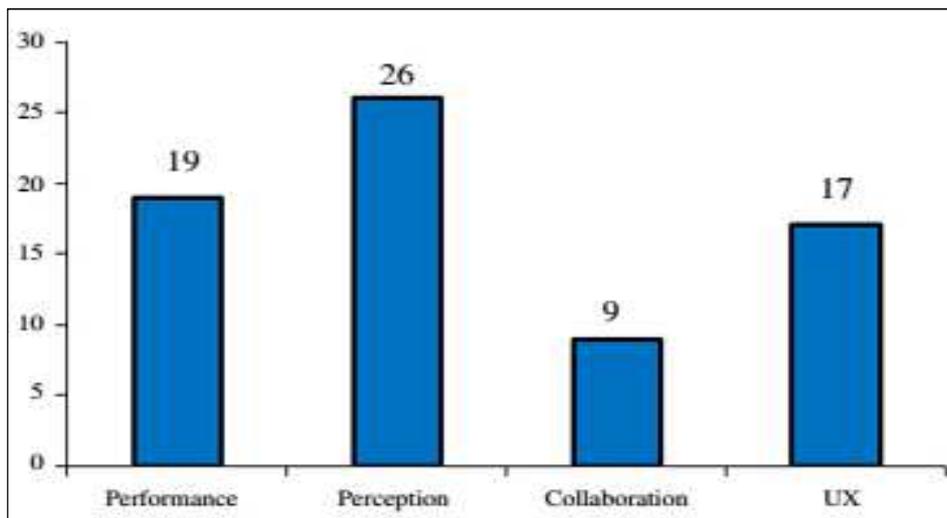


Figure 25 : Répartition du type d'étude (Bai & Blackwell, 2012).

De même, Bai et Blackwell ont classé ces études selon les quatre catégories précédentes et, ici aussi, les études sur la perception et les performances utilisateurs sont les plus nombreuses.

## 3.2 LES PROBLEMATIQUES ERGONOMIQUES ABORDEES

Comme le montre la section précédente, les études ergonomiques dans le domaine de la RA se basent majoritairement sur des mesures objectives lors de tâches spécifiques à un usage (performances utilisateur) ou lors de tâches de bas niveau permettant d'évaluer l'impact de ce type de système sur le fonctionnement cognitif et perceptif des utilisateurs.

Dans le premier cas, les problématiques et les résultats de ces études sont donc spécifiques au contexte d'emploi du prototype étudié ainsi qu'à la nature de la tâche effectuée. Par conséquent, l'exploitation plus générale de ces résultats est seulement limitée aux contextes similaires.

Cependant, dans le deuxième cas, les études sur le fonctionnement cognitif et perceptif des utilisateurs engagés dans l'interaction avec un système de RA peuvent être plus facilement généralisées à d'autres contextes plus larges. De plus, les problématiques de bas niveau, traitées ici, sont potentiellement généralisables à tout contexte de RA. Il est donc raisonnable de penser que les problématiques récurrentes traitées dans ce type d'études constituent les problèmes ergonomiques majeurs liés à l'utilisation des systèmes de RA.

Bai et Blackwell (2012) ont identifié cinq problèmes principaux traités dans les études sur la perception en RA : la perception de la profondeur et de l'occlusion, les technologies d'affichage, la disposition des informations virtuelles, la localisation spatiale sonore, et enfin les erreurs de recalage. De même, dans leur étude, Swan et Gabbard (2005) identifient trois problématiques perceptives principales : l'effet des différentes techniques de rendu graphique sur la perception, la perception de la profondeur et, enfin, les effets des caractéristiques des reconstituteurs sur la perception.

Par ailleurs Kruijff, Swan li et Feiner (2010) ont recensé et classifié les problèmes perceptifs liés à l'utilisation de systèmes de RA et les ont organisés selon la cause du phénomène (environnement, capture, augmentation, reconstituteur ou utilisateur). Le tableau suivant synthétise leurs résultats. On constate des similitudes avec ceux des publications précédentes.

Issue	Problem
<b>Environment</b>	
Structure <i>Clutter, patterns, visibility, depth, surfaces</i> (H, M, P)	Visibility, depth ordering, scene distortions, object relationships, augmentation identification, surface perception
Colors <i>Monotony, opponency</i> (H, M, P)	Depth distortion, depth ordering
Condition <i>Indoor, outdoor illumination</i> (H, M, P)	Visibility
<b>Capturing</b>	
Image resolution and filtering (H, M)	Object relationships, object segmentation, scene abstraction
Lens issues <i>Quality, wide-angle, flares, calibration</i> (H, M, P)	Object relationship, scene distortion, visibility
Exposure (H, M, P)	Depth distortion, object segmentation, scene abstraction
Color correctness and contrast (H, M, P)	Depth distortion, object relationships, object segmentation
Capturing frame rate (H, M, P)	Scene abstraction
<b>Augmentation</b>	
Registration errors (H, M, P)	Object relationships, depth ordering
Occlusion <i>Object clipping, x-ray vision</i> (H, M, P)	Visibility, depth ordering, scene distortion, object relationships
Layer interferences and layout <i>Foreground-background, clutter</i> (H, M, P)	Visibility, depth ordering, object segmentation, scene distortion, text readability
Rendering and resolution mismatch <i>Quality, illumination, anti-aliasing, color scheme, resolution mismatch</i> (H, M, P)	Depth distortion, depth ordering
<b>Display device</b>	
Stereoscopy (H)	Object relationships, visibility
Field of view (H, M)	Scene distortion, object relationships, visibility
Viewing angle offset (M)	Object relationships
Display properties (H, M, P)	Visibility, object segmentation, scene abstraction, object relationships, text legibility
Color fidelity (H, M, P)	Visibility, depth distortion, color perception
Reflections (H, M)	Visibility, object segmentation, scene abstraction, object relationships
Latency (H, M)	Scene abstraction, object matching
<b>User</b>	
Individual differences (H, M, P)	Object segmentation, scene abstraction
Depth perception cues <i>Pictorial, kinetic, physiological, Binocular</i> (H, M, P)	Object segmentation, scene abstraction, depth distortion
Disparity planes (H, M)	Depth distortion
Accommodation <i>Conflict, mismatch and absence</i> (H)	Depth distortion, size perception

Tableau 2 : Classification des problèmes perceptifs en RA (Kruijff et al., 2010).

Ces auteurs divisent les problèmes perceptifs en trois catégories principales : abstraction et distorsions de la scène, distorsion de la profondeur et arrangement des objets et enfin la visibilité. On constate que les problèmes perceptifs majeurs identifiés sont sensiblement les mêmes que ceux des études précédentes et notamment celle de la perception des distances qui semble critique en RA.

### 3.3 LA PERCEPTION « NATURELLE » DES DISTANCES

La revue de la littérature de la section précédente montre que les problématiques ergonomiques majoritairement étudiées dans le domaine de la RA concernent les aspects perceptifs et notamment la perception des distances et de la profondeur. De plus, les études exploratoires réalisées durant cette thèse (voir section 6.2) ont mené à la même conclusion : la perception des distances est un problème majeur et spécifique aux interfaces de RA.

Dans cette section, nous présentons tout d'abord une revue de la littérature sur le fonctionnement naturel de notre système visuel sur ce processus de perception des distances. Puis, dans la section suivante, nous présentons un état de l'art des études sur cette problématique précise dans le cadre de la réalité virtuelle et augmentée.

#### 3.3.1 La loi de puissance de Steven

Le fonctionnement du système visuel humain a largement été étudié en psychologie de la perception ainsi qu'en psychophysique. La perception des distances, notamment, a fait l'objet de nombreuses recherches dont celles de (Stevens, 1975). Ces travaux sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils ont abouti à l'expression d'une loi permettant de modéliser et donc de prédire les capacités humaines dans les tâches d'estimation des distances. Cette loi décrit la relation entre la distance réelle d'un stimulus ( $d$ ) et la distance estimée par un observateur ( $D$ ), et s'exprime ainsi :  $D = K \times d^n$

Le module  $K$  est un facteur d'échelle dépendant de l'unité de mesure et l'exposant  $n$  dépend de la nature de l'estimation. La majorité des études sur la perception egocentrique des distances se sont attaché à estimer la valeur de l'exposant  $n$ , et les résultats indiquent une valeur comprise entre 0.8 et 1.1 en fonction de la nature de la tâche à effectuer et de certaines propriétés de l'environnement. Cette loi semble être un outil intéressant pour prédire et comparer les performances d'estimation des distances en RA et nous fournit un indicateur pour évaluer l'efficacité de différents choix de conception. Par exemple, Waller (1999) a effectué une étude sur la perception des distances exocentriques en RV, où il a comparé l'effet de différents facteurs sur les performances des sujets. Ils ont comparé la restitution sur HMD et sur écran classique, la présence ou non d'un feedback et ont fait varier la largeur du champ visuel affiché (50°, 80° ou 100°). Leurs résultats indiquent que les utilisateurs avaient tendance à surestimer les distances exocentriques et ont montré que leurs données suivaient la loi de Steven. De plus, ils ont montré que la présence du feedback et la taille du champ visuel avaient l'impact le plus important sur la précision des réponses, alors que le type de restituteur ou l'ajout d'indice de profondeur (grille en perspective) avait une influence plus limitée.

Ces résultats sont particulièrement intéressants car (1) ils indiquent que les sujets ont une mauvaise estimation des distances en RV et éventuellement en RA ; et (2) que certains facteurs manipulables peuvent influencer et potentiellement améliorer les performances des sujets.

L'objectif du chapitre suivant est justement d'effectuer une revue des facteurs pouvant impacter la perception des distances en réalité virtuelle et augmentée.

### 3.3.2 Les indices de profondeurs

Les travaux de Cutting (Cutting, 1997, 2003; Cutting & Vishton, 1995) ont fortement impacté la communauté sur ce sujet là. Il a synthétisé les études psychophysiologiques sur la perception des distances pour en extraire les caractéristiques exogènes et endogènes permettant au système visuel humain d'estimer la distance d'un objet dans l'environnement. Cutting a recensé 15 de ces indices de profondeur (*depth cues*), et a étudié leurs indépendances et leurs efficacités selon la distance entre l'objet à estimer et l'observateur. Les résultats montrent qu'il y a neuf indices visuels majeurs, classés en deux catégories : les indices primaires (indices oculaires, physiologiques et de mouvement) et les indices secondaires (indices graphiques).

#### 3.3.2.1 Les indices primaires

Les indices classés dans cette catégorie sont essentiellement des processus proprioceptifs inconscients mis en œuvre par le système visuel humain pour estimer la distance d'un objet. Cutting et Vishton ont considéré les quatre indices suivants :

- 1) **La perspective de mouvement** : Il s'agit ici du fait qu'un objet distant en mouvement paraît se déplacer plus lentement qu'un objet proche. Analogiquement, lorsqu'un observateur se déplace, un objet distant immobile semble s'être moins déplacé (distance angulaire dans le champ visuel) qu'un objet immobile proche.
- 2) **La convergence** : Il s'agit ici de la modification de l'angle formé par l'intersection des axes de visée des deux yeux pour que ces derniers s'alignent sur un point dans l'espace. Autrement dit, plus l'objet est proche, plus les yeux doivent converger et inversement pour un objet lointain.
- 3) **L'accommodation** : C'est une modification adaptative de l'œil pour former une image nette en fonction de la distance de l'objet visé. Il s'agit ici principalement d'une modification des courbures des deux faces du cristallin pour modifier le pouvoir de réfraction de la lumière sur la rétine.
- 4) **La disparité binoculaire** : Il s'agit ici de la différence de position relative de la projection d'un même objet sur la rétine des deux yeux. Plus un objet est proche, plus il y aura de différence de position sur la rétine entre les deux yeux et inversement, plus un objet est loin, moins il y aura de différence de positionnement de la projection sur les rétines.

### 3.3.2.2 *Les indices secondaires*

Il s'agit ici d'indices exogènes essentiellement liés aux aspects « graphiques » des éléments perçus et non à des processus internes comme pour les précédents :

- 1) **La hauteur dans le champ visuel** : il s'agit ici du fait que dans le cas d'un environnement plat, un objet lointain (posé au sol) apparaît plus haut dans le champ visuel qu'un objet proche.
- 2) **L'occlusion** : Il s'agit ici du fait qu'un objet positionné devant un autre le masquera (ou partiellement) dans le champ visuel.
- 3) **La perspective atmosphérique** : il s'agit ici du fait que plus un objet est loin plus il paraît bleuté (dans la nuance du ciel) et flouté. Cela est dû à l'humidité et à la pollution contenues dans l'atmosphère.
- 4) **La taille et la densité relative** : Il s'agit ici de la mesure de la taille d'objets ou de textures projetés sur la rétine qui sont physiquement semblables en taille mais à des distances différentes. De deux objets identiques, le plus loin sera perçu plus petit que le plus proche. La densité relative concerne un groupe d'objets ou un objet fortement texturé. De deux groupes d'objets identiques, le plus éloigné paraîtra plus « dense » c'est-à-dire que les objets de ce groupe paraîtront plus proches les uns des autres. Ce principe s'applique aussi à la texture d'un objet éloigné qui paraîtra plus dense que s'il était proche.

### 3.3.2.3 *Les autres indices*

D'autres indices participent aussi à la perception des distances et notamment les indices suivants :

- 1) **Gradients de texture** : Il existe trois types de gradient de texture : gradient de taille, de compression et de densité. Deux de ces aspects sont équivalents à des indices déjà identifiés précédemment (taille et densité relative). Par ailleurs, même si certains auteurs considèrent le gradient de compression comme efficace pour la perception de la profondeur (Nagata, 91), Cutting et Millard (Cutting & Millard, 1984) n'obtiennent pas de résultats satisfaisants.
- 2) **Perspective linéaire** : La perspective linéaire est un indice puissant de profondeur. Cependant, Cutting considère que c'est une combinaison d'autres indices cités précédemment à savoir les différents gradients de textures (taille, densité et compression) mais aussi d'occlusion et l'utilisation de lignes parallèles fuyantes (à l'instar des points de fuites en dessin).
- 3) **Luminosité et ombre** : Certains auteurs (Boring, 1942; Nagata, 1991) considèrent le niveau de luminosité comme un indice de profondeur (plus un objet est lumineux, plus il est proche). Cependant, Cutting

considère que ce phénomène est un effet « théâtral » qui ne se réalise pas dans un environnement réel (position variable du soleil et donc de la source de lumière). Par ailleurs, il considère que les ombres ne sont pas des indices de profondeur en soi, mais informent sur la structure géométrique de l'objet. De plus, les ombres peuvent être considérées comme une application du phénomène de transparence qui peut être considéré comme une forme de perspective atmosphérique.

- 4) **Profondeur cinétique** : Il s'agit ici du fait qu'un objet en mouvement informe sur sa distance. Cutting considère qu'il s'agit, à l'instar de l'ombrage, d'une source d'information sur la structure de l'objet.
- 5) **Occlusion et désocclusion cinétique** : Il s'agit ici d'une combinaison de l'occlusion et de la perspective de mouvement, indices précédemment considérés dans les sources majeures d'information sur la profondeur.
- 6) **Gravité** : La gravité étant constante, la vitesse de chute d'un objet paraît plus importante à courte distance que pour un objet lointain. Les patterns d'accélération sur la rétine varient donc selon la distance et permettent ainsi de fournir une autre source d'information sur la profondeur. Cependant, Cutting ne considère pas la gravité comme un indice majeur de profondeur car cet indice ne s'applique que rarement (situation où un objet est en chute libre) et ne fournit d'information que sur un objet isolé.

### 3.3.3 Une perception discontinue

Les travaux de Cutting ont aussi porté sur la comparaison de ces indices de profondeur entre eux mais aussi selon la distance. La figure suivante synthétise ces résultats.

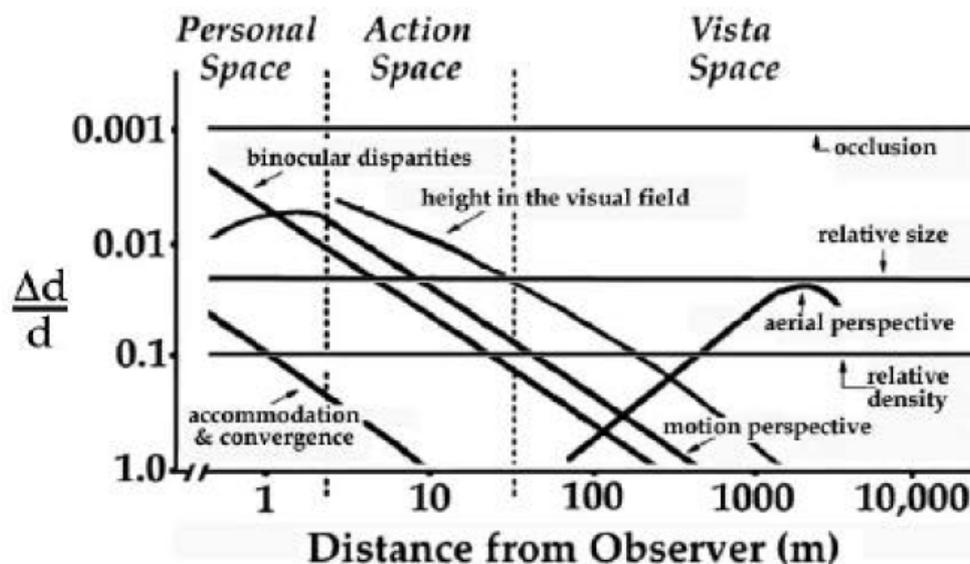


Figure 26: Efficacité des indices selon la distance (Cutting & Vishton, 1995).

L'efficacité d'un indice est donnée par le plus petit écart de profondeur perçu entre deux objets selon la distance entre ces derniers et l'observateur. Les résultats présentés ici ont mesuré l'efficacité des indices entre 0.3 et 5000 mètres. Plusieurs éléments majeurs peuvent être extraits de cette figure. Tout d'abord, elle fournit une hiérarchisation des indices selon leur efficacité sur une plage de distance conséquente. L'occlusion apparaît ici comme la source d'information de profondeur principale quelle que soit la distance. La dominance des autres indices est variable selon la distance. Le deuxième point important est justement lié à cette variabilité. Les résultats indiquent que les indices de profondeur ne réagissent pas tous de manière identique à la distance mais qu'il y a trois types de relation Sources-Distance :

- **Sources invariantes:** L'occlusion, la taille et la densité relative ont une efficacité constante quelle que soit la distance.
- **Sources se dissipant avec la distance :** La disparité binoculaire, la hauteur dans le champ visuel, la perspective de mouvement, l'accommodation et la convergence ont une efficacité qui décroît lorsque la distance augmente.
- **Source augmentant avec la distance :** La perspective atmosphérique est la seule source à avoir une efficacité qui augmente avec la distance.

Enfin, dernier résultat important et, non le moindre, les auteurs identifient trois espaces de perception visuels qui se distinguent par l'emploi d'indices différents selon la distance :

<b>Espace personnel</b>	<b>Espace d'action</b>	<b>Espace de vision</b>
entre 0 et 2m	entre 2m et 30m	au-delà de 30m
-Occlusion -disparité binoculaire -taille relative -convergence -accommodation -perspective de mouvement (de la tête).	-Occlusion -Hauteur dans le champ visuel -disparité binoculaire -taille relative -perspective de mouvement (déplacement)	-Occlusion -hauteur dans le champ visuel -taille relative -perspective atmosphérique

Tableau 3 : Les principaux indices de profondeur selon la classe de distance.

Dans l'espace le plus proche (espace personnel), mis à part l'occlusion et la taille relative, ce sont surtout les indices primaires qui sont impliqués dans la perception de la profondeur. Cela implique que la stéréoscopie est particulièrement importante à courte distance (disparité binoculaire et convergence). De plus, on constate que l'efficacité de ces indices décroît rapidement au profit des indices de profondeur secondaires qui sont majoritaires dans les espaces suivants. En effet, on constate qu'à partir de l'espace d'action, la perception des distances est essentiellement basée sur les indices secondaires qui sont monoculaires. Cela implique que, contrairement à la croyance populaire, la perception de la profondeur à moyenne et longue distance ne nécessite pas la stéréoscopie.

### 3.3.4 Distances relatives et absolues

Comme le montre la section précédente, la perception de la distance d'un objet dépend du traitement de nombreux indices visuels de profondeur. Cependant, alors que la plupart de ces indices ne fournissent qu'une information de profondeur relative ou ordinale, certains permettent une perception absolue des distances. Dans Willemsen, Gooch, Thompson et Creem-Regehr (2005), les auteurs classifient les indices selon cette dichotomie .

Ils considèrent que les indices tels que la disparité binoculaire, la taille relative, l'occlusion ou le gradient de texture sont des indices relatifs et ne permettent seulement que de déterminer si un élément dans l'environnement est plus proche qu'un autre.

A contrario, les indices absolus tels que l'accommodation, la convergence, la combinaison de la déclinaison angulaire et de la hauteur du point de vue, la perspective de mouvement et enfin la taille familière fournissent des informations sur la distance absolue d'un objet.

Les travaux de Cutting ont montré que l'efficacité de ces indices varie en fonction de la distance et que les indices absolus cités précédemment s'appliquent essentiellement à courte distance (espace personnel). Au-delà de trois mètres, l'accommodation et la convergence ne sont plus aussi efficaces, ce qui implique que dans ces classes de distance ce sont les autres indices absolus qui priment. En outre, la perspective de mouvement est aussi un indice dont l'efficacité se dissipe rapidement avec la distance et particulièrement au-delà de 30 mètres.

### 3.3.5 Conclusion sur les théories de la perception

A partir de cette revue de la littérature, nous observons un consensus autour des travaux de Cutting. Ainsi nous choisissons que le cadre théorique des études suivantes se basera sur le modèle de la perception des distances de Cutting. Par conséquent, nous ne considérerons que les neuf indices principaux qu'il propose.

Compte tenu de notre contexte d'application et des distances d'affichage des éléments augmentés, la taille familière et *la combinaison de la déclinaison angulaire et de la hauteur du point de vue* semblent donc être les indices absolus principaux qui seront exploitables. Il est à noter que ce dernier indice n'est pas pris en compte dans la classification de Cutting mais qu'il s'apparente à la hauteur dans le champ visuel qui est aussi une source d'information importante à moyenne et longue distance.

Compte tenu de cette revue de la littérature, les sources d'informations nécessaires à la perception des distances semblent être des facteurs manipulables. En d'autres termes, il semble possible de s'appuyer sur ces indices lors de la conception d'un système de RA et de son interface. Sur la base de cette hypothèse, la section suivante présentera une revue des études de la perception des distances dans le domaine de la RA. L'objectif ici, est d'identifier les indices de profondeurs étudiés volontairement ou utilisés inconsciemment dans ces études.

### **3.4 LA PERCEPTION DES DISTANCES EN REALITE VIRTUELLE ET AUGMENTEE**

La problématique de la perception des distances a été initialement étudiée dans le domaine de la réalité virtuelle où plusieurs groupes de recherche rapportent un problème récurrent d'estimation des distances. En effet, il semblerait que lorsque des participants jugent des distances egocentriques d'objets virtuels, ils auraient tendance à les sous-estimer.

Cependant, lorsque la même tâche est effectuée dans un environnement réel, les distances sont jugées correctement. Ces résultats indiquent qu'il y a des différences dans le fonctionnement du système perceptif humain qui apparaissent dans le cadre de l'usage d'environnement virtuel. Tout semble indiquer que l'espace virtuel est perçu par les participants comme comprimé, mais les causes de cette compression ne sont pas clairement identifiées. À partir de ce constat, un certain nombre d'études ont été menées dans le contexte d'environnement augmenté et notamment à courte et moyenne distance. Ces études indiquent globalement aussi un phénomène de compression spatial des éléments virtuels même en présence d'indices de profondeur naturellement présents dans l'environnement réel.

Ce problème est central pour la conception de système de RA car la perception correcte de la position des éléments virtuels est essentielle dans de nombreuses applications et notamment dans les domaines critiques tels que celui du militaire ou de la médecine. En outre, Sielhorst et al. (2008) ont publié une revue des applications de systèmes de RA dans le domaine médical et se sont particulièrement intéressés aux problèmes perceptifs sous-jacents. Ils considèrent que la perception correcte de la profondeur est le problème non résolu (à l'heure actuelle) le plus important dans ce type de contexte d'utilisation. Ce chapitre présentera une revue des études publiées dans la littérature traitant de cette problématique. L'objectif ici est d'identifier les causes potentielles de ce phénomène et les moyens de le résoudre.

#### **3.4.1 Les méthodes d'estimation des distances**

La perception visuelle, ainsi que ses composantes, telle que l'appréciation des distances étant des phénomènes conscients subjectifs, leur observation directe est impossible par une tierce personne. Dans ce contexte, les chercheurs ont dû établir des méthodes pour contourner ce problème en mesurant un comportement utilisateur qui est théoriquement relié à ses percepts. Dans la littérature, on retrouve différents types de méthode d'évaluation permettant de mesurer la perception des distances. Loomis et Knapp (2003) distinguent trois catégories : l'estimation verbale, l'action en boucle ouverte, l'action en boucle fermée.

#### **3.4.1.1 Estimation verbale**

Dans ce type de méthode, les sujets doivent estimer consciemment la distance d'un élément virtuel affiché. Il existe deux variantes de ce protocole.

La première consiste à estimer la distance absolue entre eux et l'objet. Ils énoncent ensuite à voix haute, ou par écrit, la valeur de cette distance égocentrique dans le système métrique de leur choix (mètre, yard, pied, etc.).

La deuxième variante consiste à évaluer la distance relative de l'élément virtuel affiché par rapport à un autre élément de référence (virtuel ou réel). Les sujets doivent alors indiquer si l'objet en question se trouve plus loin ou plus proche que le référent.

#### **3.4.1.2 Action en boucle ouverte**

Dans ce type de méthode, Les participants perçoivent l'objet à estimer puis, dans un deuxième temps, doivent effectuer une action leur permettant d'indiquer la position de l'objet sans le voir. La technique la plus répandue est celle du déplacement aveugle (*Blind Walking*) où les participants doivent se déplacer les yeux fermés jusqu'à la position de l'objet précédemment vu. Ainsi, les actions des sujets sont effectuées sans aucun feedback visuel leur permettant de corriger ou affiner la position visée et la position d'arrivée des sujets correspond à la distance estimée de l'objet perçu initialement.

Pour l'estimation à longue distance, il existe une variante nommée déplacement triangulé (*Triangular walking*) qui permet de limiter la distance à parcourir par les participants tout en obtenant une estimation relativement précise. Il s'agit ici de demander aux sujets d'observer un objet, puis de faire quelques pas de côté, les yeux fermés, puis de tendre le bras dans la direction de la cible.

Dans le domaine de la RV, une dernière variante de cette méthode a été développée afin de compenser la mobilité réduite dans ce type d'environnement. Cette approche, nommée déplacement sur tapis roulant (*Treadmill Walking*), permet aux sujets de parcourir de longues distances (virtuelles) malgré les contraintes matérielles des dispositifs de RV (câbles, taille de la salle, obstacles, etc.). La technique est identique à celle du *Blind walking* sauf que les sujets se déplacent ici sur un tapis roulant.

#### **3.4.1.3 Action en boucle fermée**

A l'instar de l'approche précédente, il s'agit ici aussi de demander aux participants d'effectuer une action dans l'environnement permettant d'indiquer la position d'un objet perçu. La différence réside dans le fait qu'ici, les sujets perçoivent en continu l'objet à estimer et donc que la boucle sensori-motrice n'est pas coupée.

La première variante de cette technique, appelée déplacement dirigé par la vue (*visually directed walking* ou *Direct walking*), consiste à faire déplacer les sujets jusqu'à la position de l'objet perçu et, contrairement au *Blind walking*, ils perçoivent un feedback visuel continu de leur action sur la position de l'objet à estimer. De même, on retrouve ici, aussi, les techniques de déplacement sur tapis roulant et déplacement triangulé avec la perception continue de l'objet. Parmi les approches en boucle fermée, on trouve dans la littérature une technique basée sur le déplacement d'un objet tiers pour correspondre à la

distance de l'objet à estimer. Dans ce type de méthode nommée correspondance perceptuelle (*Perceptual Matching*), les participants n'ont donc pas à se déplacer physiquement, mais à manipuler un dispositif pour ajuster la position d'un objet cible jusqu'à ce qu'elle corresponde à la position d'un objet de référence. Il existe deux variantes de cette approche. Dans la première, les sujets doivent déplacer un objet virtuel jusqu'à la position d'un référent réel et, inversement, dans la deuxième, un objet réel est manipulé jusqu'au niveau de la position perçue d'un référent virtuel.

### 3.4.1.4 Comparaison des méthodes

Les différentes méthodes présentées précédemment, au-delà des aspects pratiques, diffèrent aussi par leur efficacité et la précision des réponses obtenues. En effet, comme le montrent certaines études, ces méthodes ne permettent pas toutes de recueillir aussi précisément les distances perçues par les observateurs.

Par exemple, dans Singh, Swan li, Jones et Ellis (2010), les auteurs ont comparé les techniques d'estimation par action en boucle fermée et en boucle ouverte sur des distances proches. Dans le premier cas, les participants devaient déplacer un objet réel (une lampe) jusqu'à la position d'un objet virtuel. Dans le deuxième cas, les sujets déplaçaient leur main sous la table jusqu'à ce qu'ils considèrent qu'elle était à la même distance que l'objet virtuel affiché. Les utilisateurs ne pouvant percevoir les deux éléments simultanément, il s'agit bien d'une action en boucle ouverte. Leurs résultats indiquent un effet significatif important du mode d'estimation sur la précision des réponses et, notamment, que la technique en boucle ouverte induit une sous-estimation plus importante qu'en boucle fermée, comme le montre la figure suivante.

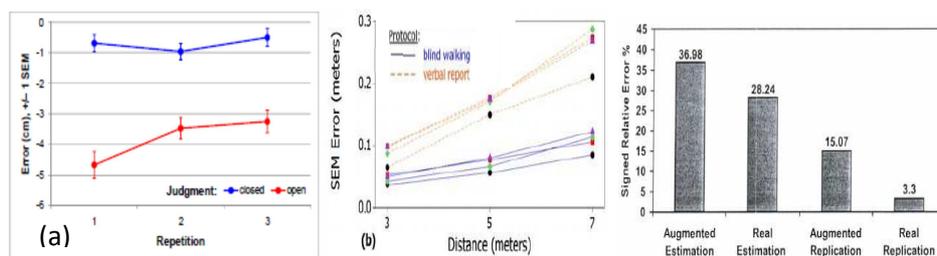


Figure 27 : Effet du mode d'estimation sur la précision des réponses : à g. issue de Singh et al. (2010), au centre, issue de Swan li, Jones, Kolstad, Livingston et Smallman (2007), à d. issue de Jerome et Witmer (2008).

De plus, nous pouvons aussi remarquer que les écarts-types sont plus importants en boucle ouverte qu'en boucle fermée, indiquant une variabilité des réponses plus importante.

De leur côté, Swan li et al. (2007) ont comparé la technique de *Blind Walking* et de *verbal report* lors d'une expérimentation à moyenne distance (3 à 7 m) sur des objets réels et virtuels. Les résultats sont similaires à l'étude précédente et indiquent une sous-estimation et une variabilité (intra et inter-individuelle) des réponses plus importante en *verbal report* qu'en *Blind Walking* et ce, quelque soit le type d'environnement (réel, RA ou RV). Jerome et Witmer (2008) ont aussi comparé la technique de *verbal report* mais cette fois à la méthode de *perceptual matching*. Leurs résultats indiquent que les réponses des participants sont plus précises avec la technique de *perceptual matching* (nommée *Replication* dans la figure) et que même en environnement réel, la technique d'estimation verbale ne permet pas de refléter précisément les distances perçues par des utilisateurs non entraînés à ce type de tâche. Enfin, dans l'étude de Livingston, M., Zanbaka, Swan li et Smallman (2005), les auteurs ont comparé les deux types de variantes de la technique de correspondance perceptuelle. Dans le premier cas, les participants devaient déplacer l'objet virtuel jusqu'à la position d'un référent réel via un trackball, et dans le deuxième cas, l'expérimentateur déplaçait un objet réel jusqu'à la position indiquée par le participant (technique du magicien d'Oz). Leurs résultats n'ont montré aucune différence significative entre ces deux types de technique.

#### **3.4.1.5 Conclusion sur les méthodes**

En résumé, les techniques en boucle fermée et notamment de correspondance perceptuelle semblent être la meilleure approche pour estimer les distances perçues par des observateurs sans introduire de biais dans les résultats obtenus.

### 3.4.2 Les causes de la sous-estimation des distances

Le phénomène de sous-estimation apparaissant lors de l'usage de système de RA ou RV semble être l'une des problématiques spécifiques de la RA (Facteur X). Au regard de notre cadre théorique, il n'est pas étonnant que la perception correcte des distances soit essentielle dans le cadre de la RA. En effet, si l'on considère les mécanismes d'élaboration des espaces perceptifs (voir section 2.4), le traitement homogène des 3+1 dimensions est essentiel. Par ailleurs, la perception des distances constitue justement le processus de traitement de l'une de ces dimensions. Il est donc logique que cet aspect ait un impact important sur l'expérience utilisateur.

Si l'on considère la situation d'usage de la RA, on observe les quatre éléments principaux suivant : l'utilisateur, le dispositif technique (matériel, restituteur), l'environnement et enfin les éléments virtuels. L'ensemble de ces parties constituent un système sociotechnique en soit comme l'illustre la figure suivante.

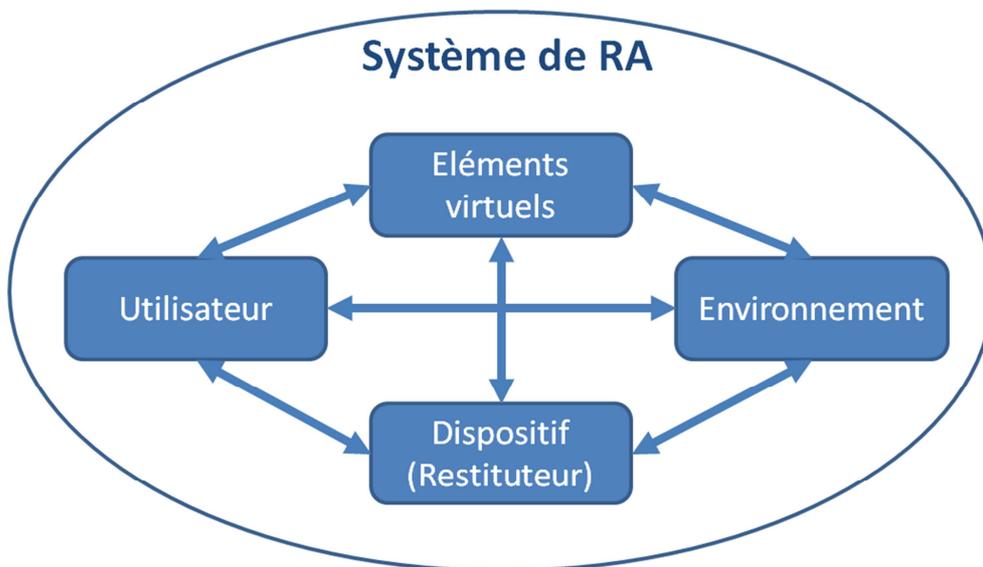


Figure 28 : Illustration d'un système de RA d'un point de vue systémique.

Chacun de ces sous-systèmes est potentiellement en cause dans le phénomène de sous-estimation des distances. Dans la section suivante, les études sont présentées et organisées selon ces quatre aspects. L'objectif ici est d'identifier les caractéristiques de chacun de ces éléments qui peuvent avoir un impact sur la perception des distances et par conséquent, d'identifier les moyens de réduire cet effet.

### **3.4.2.1 Influence des caractéristiques du restituteur**

Dans un système de RV ou de RA, le restituteur tient une place importante car il sert à afficher les éléments virtuels et permet à l'utilisateur de les percevoir. Il s'agit donc d'un maillon essentiel dans la chaîne de traitement de l'information visuelle qui a d'ailleurs été l'un des premiers à être suspecté de causer ce phénomène de sous-estimation des distances. Les effets de plusieurs caractéristiques des restituteurs ont été mesurés au travers de différentes études et, particulièrement, la réduction du champ visuel induite par l'utilisation de restituteur de type HMD.

Par exemple, dans Creem-Regehr, Willemsen, Gooch et Thompson (2003), les auteurs ont effectué plusieurs expérimentations sur l'effet de la réduction du champ visuel sur la perception des distances. Dans leur première étude, ils ont testé si la perception de nos pieds, de notre corps et du sol sous nos pieds était nécessaire pour estimer précisément les distances egocentriques. Les sujets étaient équipés d'un grand disque en carton fixé autour de leur cou afin de masquer le sol autour d'eux sur un rayon de 1,5m. Les auteurs ont ainsi comparé la précision d'estimation des distances entre la situation champ visuel (inférieur) réduit par rapport à la situation contrôle (sans le disque). Leurs résultats indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les deux conditions et, donc, que la vision du sol proche et du corps n'est pas une condition nécessaire et indispensable pour avoir une perception précise des distances egocentriques.

Dans leur seconde expérimentation, Creem-Regehr et al. ont cherché, cette fois-ci, à évaluer l'impact de la réduction du champ visuel horizontal sur la perception des distances. Mais, par ailleurs, certains auteurs (Loomis & Knapp, 2003; Wu, Klatzky, Shelton, & Stetten, 2005) ont aussi montré que la rotation de la tête en condition de champ visuel réduit avait une influence sur la perception des distances. Par conséquent, Creem-Regehr et al. ont pris en compte ce facteur dans leur protocole en intégrant une condition expérimentale supplémentaire où les utilisateurs ne pouvaient pas bouger la tête. Les résultats de leur étude indiquent qu'il n'y a pas de différence dans l'estimation des distances entre la situation contrôle et celle avec le champ de vision réduit. Cependant, une différence significative entre la condition champ visuel réduit et champ visuel réduit plus rotation de la tête bloquée a été trouvée.

Cela implique que la privation de rotation de la tête conduit à l'apparition du phénomène de sous-estimation des distances en situation de champ visuel réduit. Les auteurs concluent d'ailleurs que c'est, peut être, cette condition qui a induit les résultats obtenus dans les études précédentes où ce facteur n'était pas contrôlé.

En outre, d'autres études (Knapp & Loomis, 2004) obtiennent des résultats similaires indiquant que la seule restriction du champ visuel ne conduit pas à une sous-estimation des distances et donc que d'autres facteurs en sont la cause.

La taille réduite du champ visuel des HMD n'est pas la seule caractéristique suspectée de provoquer ce problème de sous-estimation des distances. Le poids et le volume important des restituuteurs de type HMD ont ainsi été étudiés par Willemsen, Colton, Creem-Regehr et Thompson (2004) afin d'évaluer leur impact. Plus précisément, ces auteurs ont considéré que la masse et le moment d'inertie d'un restituuteur HMD pouvaient avoir une incidence sur l'estimation des distances. Dans leur expérimentation, ils ont fabriqué une réplique d'un HMD similaire en masse, moment d'inertie et restriction du champ visuel et les ont comparés entre eux ainsi qu'à une situation contrôle (configuration de vision naturelle). La situation HMD + RV obtient le plus fort effet de sous-estimation des distances, phénomène qui apparaît aussi mais de façon moindre, dans la condition réel + maquette HMD. Les auteurs concluent que ces aspects mécaniques des HMD ne peuvent à eux seuls expliquer l'ampleur du phénomène de sous-estimation mais peuvent en partie être impliqués. Dans cette étude, le facteur majoritaire causant cet effet reste donc la restitution en RV. Il semblerait donc que ce soit essentiellement la nature synthétique de l'environnement et de l'objet à estimer qui provoque le phénomène de sous-estimation.

Parmi le large nombre de restituuteur HMD, on peut les distinguer selon, en outre, deux critères principaux: 1) la visualisation (*video* ou *optical see-through* ou immersif) et 2) la restitution (monoculaire ou bi-oculaire ou binoculaire). Ces différents types de système ont des avantages et inconvénients intrinsèques pouvant avoir des répercussions sur l'expérience utilisateur. Il est donc raisonnable de s'interroger sur l'impact de ces facteurs sur la perception des distances egocentriques.

Dans la littérature, la majorité des études portant sur la perception des distances en RA a employé des restituuteurs de type *optical see-through*. L'effet de sous-estimation des distances a été régulièrement observé avec ce type de système (Ellis & Bucher, 1994; Jones, Edward Swann II, Singh, Kolstad, & Ellis, 2008; Livingston, M. et al., 2005; Rolland & Arthur, 1997; Swan li et al., 2007; Swan li et al., 2005);. De même, certaines études (Knecht, Dünser, Traxler, Wimmer, & Grasset, 2011; Wither & Höllerer, 2005) mettent en évidence le même phénomène en utilisant des HMD de type *video see-through*.

Cependant, mis à part les travaux de Rolland et Fuchs (2000) qui présentent une revue des avantages et inconvénients des HMD vidéo et *optical see-through*, il n'y a, à notre connaissance, aucune étude comparative entre ces deux types de solution vis-à-vis de la perception des distances. Le seul aspect identifié à ce sujet par Rolland et Fuchs, est le fait que les systèmes employant des restituuteurs vidéo *see-through* peuvent plus facilement créer l'occlusion locale entre un objet virtuel et un autre réel. Les auteurs concluent donc qu'un léger avantage peut être donné aux vidéo *see-through* sur la perception des distances compte tenu du fait que l'occlusion est l'un des indices visuels de profondeur les plus puissants (Cutting & Vishton, 1995).

Concernant le type de restitution, la majorité des études a employé des systèmes de RA/RV équipés de HMDs binoculaires. Dans le domaine de la RV, ce choix s'explique par le fait que l'immersion dans un environnement virtuel est meilleure via l'utilisation de ce type de restituuteur.

De plus, la restitution binoculaire permet de fournir une vision stéréoscopique aux utilisateurs ce qui contribue de façon importante à courte distance à la perception de la profondeur (Cutting & Vishton, 1995). Même si l'essentiel des études ayant rapporté l'observation du phénomène de sous-estimation des distances a été basé sur l'emploi de HMD Binoculaire (Ellis & Bucher, 1994; Ellis, Menges, Barfield, & Caudell, 1998; Livingston, M. et al., 2005; Rolland & Arthur, 1997; Swan li et al., 2005; Wither & Höllerer, 2005), il y a cependant quelques études, dans la littérature, qui ont comparé la perception des distances en situation monoculaire et binoculaire. A notre connaissance, la première étude à été celle de Ellis et al. (1998) dans laquelle ils ont employé un reconstituteur « artisanal » *optical see-through* qui leur permettait d'afficher l'objet virtuel soit devant un seul œil, soit devant les deux. Ces travaux ont comparé l'effet de la condition de visualisation (monoculaire, bi-oculaire, stéréoscopique) sur la perception de la distance d'un objet virtuel proche (58 cm). Les résultats de cette expérimentation montrent que lorsque les indices binoculaires de profondeur sont supprimés, les performances des utilisateurs se dégradent. En effet, en condition monoculaire, tous les sujets tendent à *surestimer* la distance de l'objet virtuel. Les auteurs expliquent ce phénomène par l'interaction de plusieurs facteurs. Tout d'abord, en condition monoculaire, le seul indice de profondeur disponible est la nécessité d'accommodation de l'œil concerné. Dans le cas d'un objet de taille physique inconnue présentant des indices de profondeur ambigus, l'objet tend à être perçu comme étant situé à une distance comprise entre 2 et 3 m. De plus, en l'absence d'indices de profondeur fiables, l'accommodation et la vergence oculaire « se relaxe » à une position de repos entre 1 et 2 m. Enfin, un dernier aspect particulier de l'expérimentation pourrait être impliqué dans ce résultat. Dans ce dispositif expérimental, les sujets sont assis face à un mur gris situé environ à 2,2m. Il est donc fort probable que cet élément fortement texturé puisse constituer un point d'accroche visuel sur lequel les yeux des sujets ont pu converger et accommoder. En résumé, tous ces facteurs entraînant une convergence et une accommodation « de repos » plus lointaine que la position de l'objet virtuel (58 cm), pourraient être la cause de la surestimation des distances observée, sachant, qu'en condition monoculaire, l'accommodation était le seul indice de profondeur disponible dans ce protocole.

Dans une étude postérieure (McCandless, Ellis, & Adelstein, 2000), le même protocole a été appliqué et, dans cette expérimentation, les auteurs ont cherché à évaluer l'interaction entre la latence de rafraîchissement de l'image et la perspective de mouvement (*motion parallax*) sur l'estimation de la profondeur d'un objet augmenté en monoculaire. Les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux de l'expérimentation précédente (Ellis et al., 1998) dans le sens où toutes les appréciations de profondeur de l'objet ont été *surestimées* quand celui-ci était situé à 75cm. Mais à partir de 95cm, on observe une inversion du sens des erreurs et les réponses des sujets sont toutes sous-estimées, quelle que soit la condition expérimentale et on retrouve, alors, le phénomène classique largement observé.

Dans l'étude de Jurgens, Cockburn et Billingham (2006), les auteurs ont comparé l'efficacité de différentes représentations en RA dans une application particulière. Les sujets devaient, ici, planter un poteau à un endroit précis à l'aide des informations affichées en RA. Cette tâche nécessite une bonne perception de la distance du poteau pour pouvoir le positionner correctement. Dans cette expérimentation, les auteurs ont comparé différents modes de visualisation dont une condition monoculaire, une condition binoculaire ainsi que plusieurs représentations graphiques en RA de la position et de la distance. Leurs résultats indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les différents modes de représentation ni de différences entre la condition monoculaire et binoculaire. Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que les sujets se sont d'avantage basés sur des indices kinesthésiques pour positionner le poteau que sur les indices visuels. Il est donc difficile de conclure sur l'effet de la condition de visualisation sur la perception des distances dans cette expérimentation.

Contrairement à l'étude précédente, Creem-Regehr et al. (2003) ont cherché spécifiquement à comparer la restitution monoculaire et binoculaire sur la perception des distances en environnement réel. Dans cette expérimentation, la condition monoculaire était obtenue en masquant l'œil non-dominant, afin que la restitution de l'environnement et de la cible ne soient perceptibles que par l'œil directeur. Les résultats de cette étude n'indiquent pas de différences significatives entre les deux conditions de visualisation. Le seul effet observé est celui d'une augmentation de la variabilité de l'erreur, lorsque la distance effective de la cible augmente. Globalement, les différents travaux de Creem-Regehr et al. sur la perception des distances montrent, qu'en environnement naturel (la majorité des indices visuels de profondeur étant disponible), la seule restriction du champ visuel ou la restitution en monoculaire seul ne suffisent pas à expliquer la constatation récurrente de sous-estimation en environnement virtuel ou augmenté. De même, dans l'étude de Willemsen et al. (2005) les résultats n'ont montré aucune différence dans les estimations des distances en RV entre les conditions monoculaire, bi-oculaire et binoculaire dans un HMD. Toutes les distances ont été sous-estimées quelque soit le type de restitution.

En résumé, l'ensemble des résultats présentés ici permet raisonnablement de conclure sur plusieurs points. Tout d'abord, le type de restituteur en soi n'influence pas l'apparition du phénomène de sous-estimation des distances, car il a été observé sur les différents types de HMD possibles. Ensuite, la réduction du champ visuel induit par le port d'un HMD n'est pas non plus un facteur unique d'apparition de cet effet. Les causes de ce problème sont à trouver dans d'autres facteurs impliqués dans la perception des distances en RA.

### **3.4.2.2 Influence des caractéristiques de l'utilisateur**

La perception de la profondeur étant un processus cognitif subjectif, il est légitime de s'interroger sur l'influence des différences interindividuelles sur l'estimation des distances égocentriques. La problématique est donc de savoir si certaines caractéristiques des utilisateurs pourraient potentiellement influencer l'estimation de la profondeur en RA, ou être des facteurs de l'apparition du phénomène de sous-estimation des distances. Certains de ces aspects, qu'ils soient physiologiques, psychologiques ou comportementaux, ont parfois été étudiés dans la littérature.

#### **3.4.2.2.1 Effet de l'âge et du genre**

Par exemple, (Ellis et al., 1998) ont comparé dans leur expérimentation deux groupes de sujets d'âge différent. Le groupe « jeune » était composé de 5 sujets âgés de 15 à 29 ans, alors que le groupe « âgé » comportait 5 personnes de 38 à 47 ans. Dans une des conditions expérimentales de ce protocole, une lentille était placée devant la restitution monoculaire impliquant une modification de la dioptrie (+2) modifiant ainsi l'accommodation nécessaire pour percevoir correctement l'objet virtuel. C'est alors dans cette situation qu'une différence significative entre les deux groupes de sujet est apparue. En effet, seul les sujets jeunes ont pu fournir l'effort oculaire nécessaire pour parvenir à percevoir de façon plus précise la position de l'objet virtuel. Outre ce résultat dans cette situation particulière, l'âge des sujets ne semble pas avoir d'effet sur la perception des distances et particulièrement sur la sous-estimation des distances en RA, et de plus, cette étude est la seule, à notre connaissance, à avoir pris en compte l'effet de l'âge sur la perception des distances en RA. Cependant, ce résultat semble indiquer qu'une modification de la dioptrie influence la perception de la distance d'un objet virtuel en modifiant l'accommodation. Par conséquent, les personnes souffrant de trouble de la vision (astigmatisme, myopie, hypermétropie) peuvent avoir une perception altérée de la profondeur d'objet virtuel à courte distance, là, où l'accommodation est un indice de profondeur important.

Au-delà de la légende urbaine selon laquelle les femmes auraient un mauvais sens de l'orientation, certaines études montrent que le genre a une influence sur les capacités spatiales (McGee, 1979) et sur l'acquisition de connaissance spatiale en environnement virtuel (Waller, Hunt, & Knapp, 1998). Plus récemment, Creem-Regehr et al. (2003) ont pris en compte ce facteur dans leur étude, et malgré les tests effectués, ils n'ont trouvé aucun effet significatif du genre sur l'estimation des distances. Cependant, Jerome et Witmer (2008) ont trouvé dans leur expérimentation un effet significatif du sexe sur la perception des distances. En effet, leurs résultats semblent indiquer que les performances des sujets féminins sont plus dégradées pour les objets virtuels que pour les objets réels comparativement aux hommes.

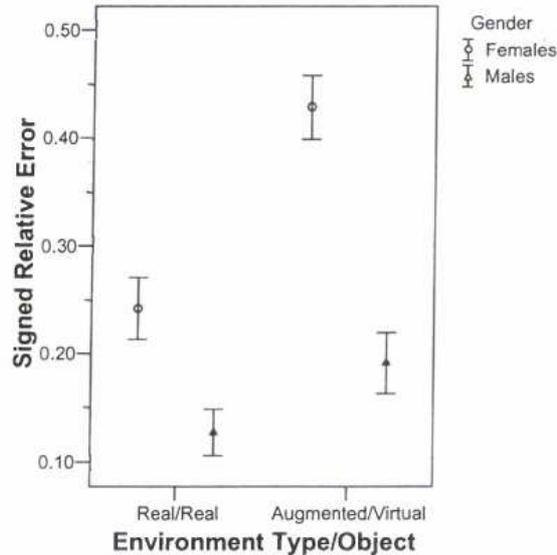


Figure 29: Effet du genre sur l'estimation des distances. (Jerome & Witmer, 2008)

En outre, LaFleur, Draper et Ruff (2001) ont trouvé un effet du genre dans une tâche de recherche visuelle de cible. Ce facteur n'influence pas directement les performances sur la tâche, mais les résultats indiquent que les sujets féminins passaient plus de temps à chercher les cibles avant de confirmer leurs réponses. Par ailleurs, l'objectif principal de cette étude était de mesurer l'effet de la dominance oculaire sur cette tâche de détection de cible. Dans leur expérimentation, les auteurs ont employé un restituéur de type HMD monoculaire et cherchaient à estimer, si le fait de le placer devant l'œil directeur ou non, avait une influence sur les performances des sujets. Leurs résultats n'ont montré aucune différence significative entre les deux conditions de visualisation.

#### 3.4.2.2 Effet de l'apprentissage et de l'expérience

Dans l'expérimentation de (Caldwell, Cornum, Stephens, & Rash, 1990), les auteurs ont comparé deux groupes de sujets sur une tâche de lecture. Le premier groupe était composé de pilotes expérimentés d'AH64 (Apache) habitués à utiliser un HMD monoculaire lors des vols, alors que le second groupe était composé de pilotes d'un autre type d'hélicoptère non équipé de HMD. La tâche expérimentale consistait à lire des lettres affichées soit en monoculaire (œil directeur ou œil non directeur) soit en binoculaire. Les résultats de cette étude auraient pu mettre en exergue un effet de la dominance oculaire, mais suite à des complications techniques (taux de luminance différent pour chaque œil), les résultats des tâches en conditions œil directeur et œil non directeur n'ont pu être comparés directement. Cependant, cette étude met en évidence un effet important du groupe : les sujets du groupe AH64 obtiennent de meilleurs résultats que les sujets de l'autre groupe, sur la lecture monoculaire avec l'œil gauche. Ces résultats font apparaître un effet de l'expérience des pilotes d'AH64 à utiliser un système monoculaire sur les performances dans cette tâche.

Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que les pilotes d'AH64 auraient une plus grande facilité à traiter séparément les informations monoculaires et pourraient plus facilement effectuer le basculement attentionnel nécessaire à ce type de tâche.

Même si cette expérimentation n'a pas directement étudié la perception des distances, elle est intéressante dans le sens où elle semble indiquer qu'un effet positif de l'apprentissage est possible sur des tâches de traitement de l'information monoculaire. Par ailleurs, Mohler, Creem-Regehr et Thompson (2006) ont montré que l'apprentissage avait un effet positif sur la précision d'estimation des distances en RV. Cette expérimentation comportait une phase d'entraînement durant laquelle les sujets effectuaient une tâche d'estimation des distances en RV avec un feedback sur la précision de leurs réponses. Les auteurs ont comparé 3 types de feedback (feedback visuel continu, feedback visuel terminal ou feedback verbal) et les ont croisé avec 2 types de méthodes de réponse des sujets (*blind walking* ou estimation verbale). Les résultats indiquent un effet positif de l'apprentissage (quelque soit la méthode) sur la précision des réponses des sujets (amélioration de 24.8% pour les estimations verbales et 15.27% pour le *blind walking*). Les deux principales conclusions des auteurs sont que, d'une part, les effets de l'apprentissage ne sont pas spécifiques à la tâche sensori-motrice de *Blind walking* mais impactent directement la perception de la distance et, d'autre part, que les effets de l'apprentissage ne sont pas spécifiques à la nature du feedback employé. Par ailleurs, Livingston, M., Swan li, Ai et Smallman (2009) ont trouvé un effet positif de la répétition sur la performance des sujets et ce, malgré l'absence de feedback contrôlé. Cela semble indiquer que les participants ont amélioré leurs capacités d'estimation des distances, simplement sur la base de leur perception sans informations sur la précision de leurs réponses.

Quels que soient les mécanismes cognitifs mis en jeu dans cette adaptation de la perception des distances, il semble donc possible d'améliorer les performances des sujets dans ce type de tâche et donc de potentiellement réduire le phénomène de sous-estimation des distances. Même si la nature du mode d'apprentissage ne semble pas spécifique pour obtenir ces améliorations, le seul élément commun est la présence d'une forme de feedback sur l'action des utilisateurs dans ce nouveau type d'interaction. Il semblerait donc que l'appropriation des propriétés spatiales de l'environnement soit générée par un bouclage action-perception et que la fourniture d'un feedback aux actions des utilisateurs permette d'alimenter et de calibrer ce processus. Parmi les indices de profondeur, la perspective de mouvement (*motion perspective*) est précisément une source d'information qui s'appuie sur ce type de processus.

#### 3.4.2.2.3 Effet du mouvement

La vision humaine se base, entre autre, sur le déplacement visuel d'un objet (le feedback) en fonction de notre propre déplacement de point de vue (l'action) pour déterminer sa distance. Ce processus se comporte comme si des règles cognitives permettaient de déterminer de façon quasi linéaire l'amplitude de déplacement d'un objet en fonction de l'amplitude de notre propre mouvement et donc de déduire la distance de la cible d'après le déplacement observé. L'amplitude d'un objet étant plus difficilement observable quand il est éloigné, il est donc logique que l'efficacité de cet indice visuel diminue quand la distance augmente (Cutting & Vishton, 1995).

L'effet de la perspective de mouvement sur la perception des distances a été étudié par différents auteurs dont McCandless et al. (2000). Ces derniers ont étudié l'effet de l'interaction entre la latence de rafraîchissement de l'image et la perspective de mouvement sur l'estimation de la profondeur d'un objet augmenté en monoculaire. Les résultats de cette étude indiquent que la condition *motion parallax* (quelle que soit la latence) réduit la sous estimation des distances et améliore donc la précision des réponses des sujets par rapport à la situation fixe. Cependant, même si le temps de réponse du système est très faible, on observe tout de même une sous-estimation importante des distances. Contrairement à cette étude, Jones et al. (2008) n'ont pas trouvé d'effet positif significatif de la *motion parallax* sur la perception des distances. Dans leur expérimentation, les auteurs ont comparé l'effet de ce facteur dans plusieurs conditions d'environnement visuel (RV, RA, Réel, Réel + HMD). Leurs résultats indiquent que la perspective de mouvement n'a un effet que sur un seul des environnements (Réel+ HMD) et que celui-ci est négatif. Étonnamment, il semblerait que la perspective de mouvement amplifie la sous-estimation des distances perçues dans cette condition. Cette conclusion semble cohérente avec celle de Willemsen et al. (2004) dans le sens où ce n'est pas la perspective de mouvement en soi qui dégrade la perception, mais plutôt que c'est la masse et l'inertie du HMD qui modifie le feedback proprioceptif des observateurs lors de leur propre mouvement, faussant ainsi le bouclage action-perception, permettant de déterminer la distance d'un objet perçu.

Un autre résultat intéressant de cette expérimentation est la comparaison de la sous-estimation des distances en fonction du type d'environnement. En effet, un des résultats les plus importants exposés ici, est que la sous-estimation est considérablement réduite en RA et, est significativement plus faible que celle en RV. Même si la tâche était la même entre toutes les conditions expérimentales, il y a cependant de nombreuses différences entre la condition RA et la condition RV (champ de vision du HMD plus réduit, le poids et l'inertie plus importante, restitution binoculaire, qualité du rendu graphique, etc.). Comme l'indiquent les auteurs, l'ensemble de ces facteurs a déjà été étudié dans la littérature et même, si certains de ces aspects ont été démontrés comme participant partiellement au phénomène de sous-estimation, aucun ne peut l'expliquer totalement.

Il semblerait donc que se soit la combinaison de plusieurs de ces facteurs ou la nature même de l'environnement qui provoque l'apparition de ce phénomène. Dans le deuxième cas, il convient donc de s'interroger sur ce qui caractérise les environnements et sur les facteurs de ces derniers qui puissent influencer la perception des distances.

### **3.4.2.3 *Influence des caractéristiques l'environnement***

Comme l'indique l'étude décrite précédemment, le type d'environnement semble avoir une influence sur la perception des distances. En effet, le phénomène de sous-estimation constaté est plus important dans les environnements purement virtuels, même si il est aussi présent dans certaines études en RA. Même si cet effet semble apparaître dans les différents environnements, son importance n'est pas constante aux travers des différentes études. Certaines différences dans les protocoles expérimentaux doivent donc influencer l'intensité de la sous-estimation. La majorité des études étant différentes, il est donc difficile de comparer directement leurs résultats, de façon métrique. Cependant, les tendances observées de façon récurrentes peuvent raisonnablement être considérées comme généralisables. De plus, les variations de l'importance de cet effet doivent avoir des causes identifiables dans les écarts entre les études. Autrement dit, les différences dans les paramètres utilisés peuvent potentiellement faire apparaître les facteurs influençant effectivement la sous-estimation des distances.

L'objectif de cette section est donc de comparer les approches de ces études plutôt que simplement comparer les résultats obtenus.

STUDY	DISTANCES	NE	PROTOCOL
<b>AUGMENTED REALITY</b>			
Current Study	3.0 – 7.0	96%	Direct Walking
[Swan II et al. 2006]	5.25 – 44.31	99%	Perceptual Matching
[Swan II et al. 2007] (AR)	3.0 – 7.0	79%	Direct Walking
[Swan II et al. 2007] (AR+Real)	3.0 – 7.0	82%	Direct Walking
<b>REAL WORLD</b>			
Current Study	3.0 – 7.0	94%	Direct Walking
[Interrante et al. 2006]	3.0 – 9.2	100%	Direct Walking
[Knapp 1999]	5.0 – 15.0	100%	Triangulated Walking
[Swan II et al. 2007]	3.0 – 7.0	88%	Direct Walking
[Thompson et al. 2004]	5.0 – 15.0	95%	Triangulated Walking
[Willemsen and Gooch 2002]	2.0 – 5.0	100%	Direct Walking
[Willemsen et al. 2004]	4.0 – 8.0	100%	Direct Walking
[Willemsen et al. 2004]	4.0 – 8.0	88%	Triangulated Walking
[Witmer and Sadowski 1998]	4.6 – 32.0	92%	Treadmill Walking
<b>REAL WORLD SEEN THROUGH HMD</b>			
Current Study	3.0 – 7.0	92%	Direct Walking
[Swan II et al. 2007]	3.0 – 7.0	83%	Direct Walking
[Willemsen et al. 2004]	4.0 – 8.0	85%	Direct Walking
[Willemsen et al. 2004]	4.0 – 8.0	67%	Triangulated Walking
<b>VIRTUAL REALITY</b>			
Current Study	3.0 – 7.0	90%	Direct Walking
[Interrante et al. 2006] (Base)	3.0 – 9.2	95%	Direct Walking
[Interrante et al. 2006] (Post)	3.0 – 9.2	96%	Direct Walking
[Durgin et al. 2002]	2.0 – 8.0	65%	Direct Walking
[Knapp 1999]	5.0 – 15.0	42%	Triangulated Walking
[Thompson et al. 2004]	5.0 – 15.0	44%	Triangulated Walking
[Willemsen and Gooch 2002]	2.0 – 5.0	81%	Direct Walking
[Willemsen et al. 2004]	4.0 – 8.0	62%	Direct Walking
[Willemsen et al. 2004]	4.0 – 8.0	47%	Triangulated Walking
[Witmer and Sadowski 1998]	4.6 – 32.0	85%	Treadmill Walking

Tableau 4: Erreurs normalisées moyennes de différentes études (Jones, Swan li, Singh, Franck, & Ellis, 2009).

Typiquement, Jones et al. (2008) n'obtiennent pas de différence significative dans la précision d'estimation des distances entre la condition RA et la condition contrôle (réelle). Cependant, ils constatent tout de même une sous-estimation importante dans la condition RV. Suite à ces résultats surprenants, les auteurs ont reproduit l'expérimentation une nouvelle fois (Jones, Swan li, Singh, & Ellis, 2011) afin de vérifier si l'absence inhabituelle de sous-estimation en RA était due à un effet de transfert d'une condition expérimentale à une autre, au cours de leur premier protocole intra-individuel. Ils ont donc construit, cette fois-ci, un protocole de type interindividuel. Leurs nouveaux résultats indiquent toujours une absence de sous-estimation significative en condition RA, alors qu'elle est présente en RV, mais de façon particulièrement limitée. Cependant, les auteurs constatent une amélioration des performances des sujets au cours des essais. Il semblerait qu'il y est un effet d'apprentissage permettant aux utilisateurs d'estimer de façon plus précise la distance au fur et à mesure de l'expérimentation, mais uniquement en condition réelle et RA. Dans ces expérimentations, les sujets n'obtenaient pas de feedback explicites de leurs actions (ou du moins de leurs performances) mais l'amélioration, au cours du temps, semblerait indiquer qu'un feedback serait fourni par un aspect non contrôlé dans le protocole.

Au vu de ce résultat, les auteurs ont développé une nouvelle expérimentation afin de mieux cerner ces causes. En analysant plus finement leur protocole, les auteurs ont identifié deux sources possibles de feedback indirect : 1) le retour proprioceptif de la tâche de *blind walking* lui-même durant le retour ou 2) les informations visuelles périphériques issues d'un espace entre le HMD et le visage des sujets. Cette troisième expérimentation vise donc à comparer l'impact de ces deux aspects sur l'estimation des distances en RV en comparant deux situations différentes où chacun des facteurs est isolé. Leurs résultats indiquent clairement que ce sont les informations visuelles périphériques qui sont la source de feedback indirect influençant les performances des utilisateurs durant leurs précédentes études. En outre, ce test ayant été effectué seulement en RV, les auteurs ont ensuite cherché à vérifier si cette source de feedback ne serait pas la cause de l'absence de sous-estimation significative en RA. Ils ont donc reproduit ce troisième protocole mais cette fois-ci dans la condition RA. Finalement, une fois privées des informations visuelles périphériques, les performances des utilisateurs chutent et les résultats mettent en lumière une sous-estimation significative et importante (75.9%). Mais le résultat le plus intéressant est que cette sous-estimation apparaît aussi dans le cas réel+HMD ce qui indiquerait que c'est l'environnement visuel ambiant et non l'objet virtuel en lui-même qui influe sur la sous-estimation des distances. Cela explique que les environnements augmentés souffrent moins de ce problème de sous-estimation que les environnements purement virtuels.

On trouve dans la littérature d'autres expérimentations qui ont directement comparé l'impact de ces différents environnements sur la perception des distances. Par exemple, Swan Li et al. (2007) ont trouvé, dans leur seconde expérimentation, un effet significatif de l'environnement sur la précision des réponses des sujets. Toutefois, dans leur protocole, les auteurs ont utilisé un HMD au champ visuel assez réduit ( $27^{\circ} \times 20^{\circ}$ ) qui de plus, était fixé à un support empêchant ainsi les sujets de déplacer leur point de vue et de bénéficier de la perspective de mouvement. La combinaison de ces deux aspects a pu induire la sous-estimation des distances, constatée ici même dans la condition réelle + HMD. Ce résultat est cohérent avec ceux de Wu et al. (2005) décrits précédemment.

De même, Jerome et Witmer (2008) ont obtenu des résultats similaires en comparant l'estimation d'objet réel et virtuel dans l'environnement réel. Les sujets estiment, de façon plus précise, la distance dans la condition réelle que la condition augmentée et ont tendance à sous-estimer de façon plus importante en RA. Cependant, après une analyse plus fine de leurs résultats, les auteurs concluent que cet effet est entièrement dû aux performances des sujets féminins sur cette tâche ; résultats qui ont d'ailleurs déjà été présentés dans la section précédente (3.4.2.2).

Dans un environnement réel, la présence d'éléments physiques peut masquer la position des éléments virtuels affichés. Par conséquent, ces éléments sont perçus en superposition de ces masques naturels même si leur position est potentiellement plus éloignée.

Cette situation de « vision à rayon X » (*Xray vision*) peut avoir des conséquences sur la perception des distances car un conflit entre les indices de profondeur émerge alors. En effet, l'occlusion étant l'indice majoritaire quelle que soit la distance (Cutting & Vishton, 1995), si un objet est visible devant un autre, notre système visuel l'interprète comme étant plus proche. Cet effet de l'occlusion a été étudié dans la littérature et notamment par Ellis et Bucher (1994). Dans leur expérimentation, les auteurs ont montré que la présence d'un masque physique réel (*occluder*) dégradait les performances des sujets dans une tâche d'estimation de la distance d'un objet virtuel. En effet, les participants avaient tendance à sous estimer la distance de l'objet virtuel et notamment lorsque l'objet masquant était dynamique (rotation). Selon les auteurs, la présence du masque a contraint les sujets à faire le point sur l'objet dynamique, impliquant ainsi une modification d'un autre indice de profondeur, la convergence oculaire. Cette expérimentation ayant été effectuée à courte distance (entre 27 et 180 cm), cet indice avait donc une influence importante sur l'estimation des distances. Ces résultats se retrouvent aussi dans Ellis et al. (1998), où les auteurs ont trouvé que la présence d'un objet interposé augmentait la sous-estimation des distances quelle que soit la condition de visualisation (monoculaire, bi-oculaire ou stéréo). Cependant, dans l'étude de Swan li et al. (2005), les auteurs ont, certes, trouvé un fort effet de l'occlusion sur les performances d'estimation des distances (augmentation d'environ 44% des erreurs), mais seulement sur les erreurs absolues et non sur les erreurs signées.

Par conséquent, les auteurs n'ont pu conclure à une amplification de la sous-estimation mais seulement à une augmentation des erreurs. Un autre résultat intéressant de cette étude concerne un effet de la proximité entre les cibles (référénts réel) et les murs du lieu de l'expérimentation. Les résultats indiquent une réduction des erreurs commises lorsque les cibles sont proches des murs ainsi qu'une atténuation de l'augmentation des erreurs en fonction de la distance. Les auteurs ne proposent pas d'explication spécifique à ce constat, mais supposent que les forts indices de perspective linéaire présents dans le couloir ont dû aider les participants à estimer les distances.

Afin de vérifier cette hypothèse, les auteurs ont effectué une expérimentation supplémentaire (Livingston, M. et al., 2009) permettant de comparer l'estimation des distances en environnement intérieur (*Indoor*) et en environnement extérieur (*outdoor*). Leurs résultats indiquent une différence significative entre les deux types d'environnement avec une tendance à la sous-estimation constante en intérieur et une surestimation en extérieur ainsi qu'une augmentation plus importante de l'erreur en fonction de la distance dans cette dernière situation. Ces résultats sont contradictoires avec ceux obtenus dans les mêmes conditions expérimentales dans l'étude de Swan li et al. (2006) où les auteurs ont constaté une inversion dans le sens de l'erreur vers 23 m, indiquant le passage d'une sous-estimation vers une surestimation. Ce résultat unique et particulièrement intéressant sera discuté plus en détail, ultérieurement dans ce document.

Un autre facteur de l'environnement, qui est étudié dans la littérature, concerne l'impact de la luminosité et des ombres. En effet, même si ces aspects ne sont pas considérés par Cutting (2003); (Cutting & Vishton, 1995) comme des indices de profondeurs majeurs, d'autres auteurs ont étudié leur impact sur une tâche de perception des distances. Dans l'étude de Knecht et al. (2011), les auteurs ont évalué l'effet de différents modes de rendu graphique de l'élément augmenté (un cube) en s'appuyant sur l'illumination globale et les ombres. En résumé, le but de la tâche expérimentale consistait à déplacer un cube réel sur la position du cube virtuel ou inversement. Leurs résultats n'indiquent aucun effet significatif de ces variables sur les performances des participants. Cependant, lors des entretiens post-tests, les sujets ont indiqué s'être appuyés sur l'occlusion pour effectuer la tâche plus que sur les effets lumineux. De plus, les auteurs ont identifié un certain nombre de biais expérimentaux dans leur protocole qui pourraient expliquer l'absence de différence entre les modes. Plus globalement, l'objectif de ces recherches était d'évaluer l'intérêt du photoréalisme en RA et notamment sur l'estimation de la profondeur, ce qui conduit finalement à s'intéresser à l'impact de l'élément virtuel lui-même sur la perception de sa distance.

#### **3.4.2.4 Influence des caractéristiques de l'élément virtuel**

La problématique de l'impact du réalisme graphique des éléments augmentés sur la perception des distances a été notamment étudiée par Kirkley (2003). Durant ces expérimentations, les auteurs ont cherché à évaluer l'impact de différentes représentations graphiques d'un objet sur l'estimation de sa distance. Pour cela, ils ont comparé quatre types d'objets : réel, virtuel photoréaliste, virtuel 3D abstrait et virtuel 2D abstrait. Les deux derniers objets représentaient des formes géométriques abstraites (sphère, pavé, pyramide, tore) alors que les deux premiers représentaient des objets réels familiers (chaise, bouteille, etc.). Les résultats indiquent que les participants estiment plus précisément la distance des objets réels que tous les autres types d'objets et que les distances des modèles 3D photoréalistes sont mieux estimées que les formes géométriques abstraites. Une sous-estimation constante a d'ailleurs été observée. Ces résultats indiquent que la taille familière des objets constitue un indice de profondeur important pour le système visuel humain. Cet aspect fournit un facteur d'échelle permettant de mieux estimer la distance à laquelle se trouve l'objet donnant ainsi une référence pour l'indice de taille relative. De plus, les auteurs ont comparé leurs résultats à ceux d'une étude similaire (Witmer & Kline, 1998) et ont trouvé une différence significative (*t-test*) entre ces deux séries de données. Kirkley suppose que la taille familière des objets utilisés dans son protocole est l'hypothèse la plus probable expliquant la meilleure précision obtenue par les participants de son étude. Cette hypothèse est cohérente des résultats obtenus dans Loomis et Knapp (2003), qui ont mis en évidence que la taille familière est un indice de profondeur permettant d'améliorer l'estimation d'objets lointains.

Par ailleurs, les auteurs ont trouvé un effet d'interaction significatif entre le type de HMD utilisé (Sony Glasstron vs Microvision Nomad) et le type de forme géométrique abstraite (2D vs 3D).

En effet, les estimations des participants sont plus précises avec le HMD bionculaire (Glasstron) lorsque les objets sont en 2D et inversement, les résultats sont meilleurs avec le HMD monoculaire (Nomad) lorsque les items sont en 3D. Les auteurs ne proposent aucune explication à cet étrange résultat. Même si aucun effet principal n'a été trouvé en comparant les formes 2D et 3D, la prise en compte du type de HMD indique que cet aspect peut avoir une influence sur la perception des distances.

L'effet de la représentation graphique a aussi été étudié dans Livingston, M., Swan li, Gabbard et hollerer (2003), où les auteurs ont comparé l'impact de différents styles graphiques sur l'estimation de la distance d'objets virtuels en situation d'occlusion (*X-ray vision*). Les auteurs ont conçu trois modes d'affichage illustrés dans la figure suivante.

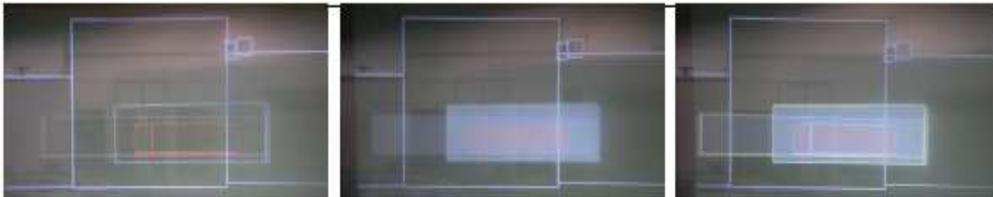


Figure 30: Les trois modes graphiques: filaire (à g.), plein (centre) et filaire + plein (à d.). Issue de Livingston, M. et al. (2003).

Leurs résultats indiquent un effet significatif du mode de représentation sur les performances des participants. Que se soit pour le temps de réponse ou pour la précision d'estimation, le mode filaire + plein obtient les meilleurs scores devant les deux autres modes et inversement, le mode filaire (seul) obtient les scores les plus faibles. Selon les auteurs, ces résultats sont globalement cohérents de ceux de la littérature en IHM dans le sens où la redondance graphique d'une information améliore sa transmission. De plus, les auteurs ont aussi évalué l'impact de la transparence et de l'intensité lumineuse sur cette tâche perceptive. Leurs résultats indiquent que la modulation de ces deux facteurs améliore la perception de la distance mais seulement dans le cas de la première représentation (filaire).

Par conséquent, les auteurs ne considèrent pas cet effet comme un indice de profondeur majeur comparativement aux autres facteurs graphiques manipulés.

A l'instar de cette étude, d'autres auteurs ont considéré l'effet de la représentation graphique d'un objet virtuel sur la perception de sa distance. Dans l'étude de Rolland et Arthur (1997), les auteurs ont évalué l'impact de la taille et du type de forme géométrique sur l'estimation des distances proches (0.8 m). Le protocole s'appuyait sur quatre types de formes géométriques (Cube, cylindre lisse, cylindre à facettes, Octaèdre) ainsi que trois tailles différentes (de 3 à 6 cm). Contrairement aux hypothèses des auteurs, le cylindre lisse de petite taille obtient les meilleurs scores comparativement aux objets ayant plus de saillances et donc plus d'informations tridimensionnelles sur leur configuration tel que le cylindre à facettes.

La modification de la taille de l'objet semble n'avoir qu'un effet aléatoire sur la variabilité des réponses et donc aucune corrélation n'a été extraite de cette étude. Même si les causes ne sont pas clairement identifiées par les auteurs, globalement, les résultats montrent que la structure géométrique de l'objet peut avoir une influence sur l'estimation de sa distance. Sugano, Kato et Tachibana (2003) ont notamment étudié l'effet de l'ombre d'un objet virtuel sur la perception de sa position spatiale (hauteur et profondeur). Leurs résultats indiquent que ce facteur est particulièrement efficace en condition monoculaire pour déterminer sa distance en l'absence des indices stéréoscopiques disponibles dans la condition Binoculaire (qui obtient d'ailleurs les meilleurs résultats). Malgré tout, l'effet des ombres est aussi significatif dans cette condition, ce qui indique une additivité des indices de profondeur.

### **3.4.3 Conclusion sur la sous-estimation**

Cette section a présenté la revue des facteurs pouvant influencer le phénomène de sous-estimation ainsi que les méthodes employées. En résumé, il semblerait que ce phénomène ne soit pas dû à un paramètre unique en particulier, mais en la combinaison de plusieurs facteurs. Les troubles de la perception des distances émergent lorsqu'un conflit entre plusieurs indices de profondeur apparaît. De plus, l'occlusion étant l'indice le plus puissant quelle que soit la distance, les conflits avec cet indice sont les plus critiques. En outre, l'aspect positif de ce constat est qu'il est donc possible d'améliorer les performances des participants lorsque le maximum d'indices de profondeur est pris en compte dans la conception. En ce qui concerne les méthodes, les approches expérimentales sont spécifiques à cette problématique. Les protocoles employés sont clairement identifiés ainsi que les métriques permettant l'observation et le recueil de la perception des distances. Ici, aussi, la littérature converge vers les approches en boucle fermée (*perceptual matching*).

## **4. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART ET PROBLÉMATIQUES**

---

### **4.1 LA RA : UN CONCEPT POLYMORPHE A DEFINIR**

La revue de la littérature et des applications de la RA permet de constater le caractère polymorphe de la RA. Il existe une grande diversité dans la mise en œuvre de ce concept, que se soit par le dispositif de restitution, par la technique de recalage employée, par le type d'éléments virtuels affichés, ou tout simplement par le contexte d'emploi de ces systèmes.

La notion de réalité augmentée ne peut donc pas se réduire à une « simple » technologie innovante, car d'une certaine manière, elle est indépendante des technologies sous-jacentes employées. Il s'agit donc d'un concept plus large, d'un nouveau paradigme d'interface basée sur une association perceptive du réel et du virtuel. Définir la RA n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît, il n'est donc pas surprenant de ne pas trouver de consensus dans la littérature. Les définitions et taxonomies uniquement techno-centrées ne suffisent pas à définir la RA dans sa globalité, elles sont trop réductrices. La RA nécessite une définition claire et suffisamment précise pour discriminer une IHM de RA des autres et disposer d'une classification suffisamment souple et générative pour permettre de rendre compte de sa nature polymorphe. Cette taxonomie doit avoir une portée heuristique afin de fournir un cadre scientifique pour la conception et l'évaluation de systèmes futurs.

Cette problématique constituera un des principaux axes de recherche de cette thèse.

### **4.2 ERGONOMIE ET RA : DES PROBLEMATIQUES SPECIFIQUES**

Même si le nombre d'études utilisateurs reste encore minoritaire par rapport aux études techniques dans le domaine de la RA, on constate une augmentation au cours de ces dernières années. Le développement des technologies sous-jacentes à la RA commence à atteindre une maturité suffisante pour que les problématiques ergonomiques puissent être abordées.

Ce faible nombre d'études utilisateurs ainsi que la grande variété des systèmes de RA évalués ne permettent pas encore l'élaboration de recommandations ou de listes de critères ergonomiques pour la conception. Par conséquent, en l'état actuel des connaissances, les tests utilisateurs sur tâches élémentaires de bas niveau ainsi que sur des tâches spécifiques au contexte d'emploi visé semblent être les principales sources de recommandations pour la conception de système de RA.

Lorsque l'on considère les problématiques traitées par ce type d'étude dans la littérature, on constate des problèmes récurrents qui semblent spécifiques aux systèmes de RA. Le fonctionnement cognitif et perceptif des utilisateurs en environnement mixte est très différent des IHM 2D classiques.

En effet, la fusion d'éléments virtuels et de l'environnement réel soulève des problématiques originales ou rarement abordées dans d'autres contextes. Ces problématiques peuvent être classées en trois grandes catégories, selon le niveau de l'interaction.

La première catégorie concerne l'impact du système de RA sur la perception bas niveau de l'IHM et de l'environnement. Il s'agit ici de l'impact des caractéristiques techniques du système (restituteur, recalage, etc.) sur la perception de l'environnement réel principalement.

La deuxième catégorie concerne l'impact de la RA sur la perception des éléments virtuels. Cela intègre notamment les problèmes de lisibilité, de relation entre les objets ou de leur disposition.

Enfin, la troisième catégorie concerne le traitement plus haut niveau des IHM de RA et intègre les problèmes liés à l'interprétation de la scène augmentée, la perception de la position et de la profondeur, ou encore la corrélation entre objets réels et virtuels.

Ces trois catégories serviront justement de cadre d'évaluation pour les études exploratoires présentées dans les chapitres suivants.

### **4.3 PERCEPTION DES DISTANCES EN RA : UNE PROBLEMATIQUE MAJEURE**

La revue de la littérature précédente nous permet d'extraire un certain nombre d'éléments clés concernant la perception des distances en RA. Tout d'abord, nous constatons globalement un problème récurrent dans la précision d'estimation des distances des objets virtuels et que ces erreurs s'amplifient avec la distance. Même si la direction et/ou l'amplitude des erreurs divergent d'une étude à l'autre, il semblerait que le phénomène de compression spatial observé en RV apparaisse aussi, mais de façon moindre, dans les environnements augmentés.

Ces derniers, fournissant naturellement plus d'indices de profondeur non nécessairement maîtrisés par les différents protocoles, permettent aux participants d'estimer les distances plus précisément qu'en environnements purement synthétiques. Malgré tout, le phénomène persiste en RA, ce qui indique que d'autres facteurs sont impliqués.

Les auteurs qui se sont intéressés à ce problème ont essayé d'en identifier les causes et notamment l'impact du type de restituteur employé. Ici aussi, les résultats sont divergents mais nous observons tout de même que les difficultés de perception des distances apparaissent quel que soit le type de restituteur (HMD, écran, monoculaire, binoculaire, *Optical see-through* ou *video see-through*). Cependant, à notre connaissance, on constate que toutes les études en monoculaire ont été faites sur l'œil directeur des sujets. La littérature est donc lacunaire sur le rôle de la dominance oculaire et son impact potentiel sur la perception des distances en environnement virtuel et augmenté.

En ce qui concerne les facteurs liés à l'individu, on constate que l'apprentissage a un effet positif sur les performances. Il semble donc possible de compenser ou tout du moins de réduire ce phénomène par l'entraînement. Par ailleurs, un effet du genre a été signalé de façon isolée dans la littérature.

Même si les causes ne sont pas clairement identifiées, il semblerait que le phénomène de sous-estimation soit plus prononcé pour les femmes que pour les hommes. Cependant, cet effet n'a été constaté que dans une seule publication et nécessiterait d'être vérifié par des études complémentaires.

La nature même de l'objet à estimer semble avoir un impact sur l'estimation des distances. En effet, différentes études dans la littérature montrent un effet du type de représentation graphique sur les performances et notamment que les objets familiers favorisent la perception de leurs distances. Cela indique que l'indice de profondeur « taille familière » a une influence positive sur ce type de tâche. Enfin, parmi les différentes méthodes expérimentales d'estimation des distances, les approches basées sur l'« action en boucle fermée » semblent fournir les meilleurs résultats et notamment la technique de correspondance perceptuelle (*Perceptual matching*).

Compte tenu de cette revue de la littérature, le problème de sous-estimation constaté durant les études exploratoires (voir section 6.3.1) ne semble pas spécifique à notre contexte technique mais généralisé à tous les systèmes de réalité virtuelle et augmentée. Ce problème semble émerger d'un conflit entre différentes sources informant sur la distance d'un objet ou la configuration spatiale de l'environnement d'un observateur. L'estimation des distances des éléments tactiques est particulièrement critique dans le domaine militaire et notamment à moyenne et longue distance (au-delà de 20m). Si l'on se réfère aux travaux de Cutting et Vishton (1995), les indices de profondeur mis en jeu à ces classes de distance sont essentiellement de type monoculaire. Cela est particulièrement intéressant car ces indices seraient compatibles de l'emploi de restitués de type monoculaire.

L'ensemble de ces éléments indique qu'il est donc possible de fournir une bonne perception d'objets virtuels à moyenne et longue distance à partir d'un système de RA monoculaire, ce qui constitue notre première hypothèse générale.

Par ailleurs, Le rôle et l'impact de certains de ces indices ont été étudiés dans le cadre de la perception en réalité virtuelle et augmentée et les résultats de ces travaux semblent indiquer que la prise en compte de ces aspects améliore l'estimation des utilisateurs.

Notre seconde hypothèse générale est donc que l'intégration de ces indices de profondeur dans la conception des IHM de RA peut améliorer les performances des utilisateurs.



# **Élaboration et Application d'une taxonomie pour la RA**



## 5. TAXONOMIE DE LA RA : PROPOSITION ET PREMIÈRE APPLICATION

---

### 5.1 PRESENTATION DE LA CLASSIFICATION WOTSH&R

A partir de l'analyse de la littérature sur les définitions et différentes taxonomies et de la grande diversité des applications de la RA présentée dans le chapitre précédent, nous considérons la définition suivante :

La RA désigne les dispositifs techniques permettant l'interaction avec plusieurs espaces perceptifs intégrant des éléments virtuels directement dans un environnement réel perçu par un utilisateur, sans nécessairement être fusionnés intégralement avec celui-ci.

Cette proposition de définition intègre certains aspects pouvant être utilisés comme critères de classification. Le premier axe concerne la distinction de ces différents espaces perceptifs. En effet, la présentation d'informations virtuelles dans un espace donné, ou ses propriétés interactives, peuvent être fondamentalement différentes de celles d'un autre espace et cela peut constituer en soit un moyen de discriminer différentes applications de RA.

Ensuite, la nuance apportée quant à la fusion non nécessaire avec l'environnement induit plusieurs niveaux d'intégrations des éléments virtuels dans le réel. Cet aspect constitue un second axe de la classification. De même, la notion d'environnement réel perçu par un utilisateur renvoie au principe que nous percevons notre environnement immédiat (i.e. environnement où est situé notre corps) mais que nous pouvons aussi percevoir un environnement distant dans les cas de télémanipulation. L'environnement perçu désigne alors l'espace réel dans lequel se déroule l'activité de l'utilisateur, qu'il soit immédiat ou distant. De plus, l'activité dans cet espace peut être statique ou mobile. Cette distinction peut avoir de lourdes conséquences quant aux choix technologiques sous-jacents.

Enfin, les dispositifs techniques modifiant notre capacité de perception, nous intégrerons un axe dans la classification s'intéressant précisément à la brique technologique ayant un impact direct sur notre perception, c'est-à-dire le type de restituteur employé. Nous proposons donc une classification basée sur les quatre axes suivants :

- Espaces perceptifs utilisés
- Nature des éléments virtuels
- Nature du contexte d'utilisation
- Type de restituteur employé

### 5.1.1 Axe 1 : classification des espaces perceptifs

Au vu de l'importance du lien spatio-temporel entre un élément virtuel et l'environnement réel, il n'est pas surprenant de trouver autant de taxonomie proposant d'intégrer cette notion pour classer les systèmes de réalité mixte. Tout d'abord, les notions d'environnement perceptif (Dubois, Nigay, & Troccaz, 2001), cadres d'affichage (Fuchs et al., 2010), ou fenêtres d'affichage (Feiner et al., 1993) semblent désigner le même concept, celui d'un espace en 3+1 dimensions intégrant un ensemble d'éléments cohérents accessible à la perception.

Même si la fusion d'éléments virtuels directement dans l'environnement réel pour former un espace perceptif augmenté est le but ultime de la RA, il est possible d'identifier d'autres types d'espaces perceptifs accessibles par ces systèmes. Par ailleurs, la relation spatio-temporelle entre ces espaces perceptifs et l'utilisateur peut être utilisée pour les distinguer et, donc, à l'instar de certaines taxonomies (Normand & Moreau, 2012; Normand et al., 2012), le nombre de degrés de liberté servira de critère discriminant. L'utilisateur agit dans le réel et selon ses mouvements et déplacements, le système de RA fournit une réponse en conséquence. Ce feedback se traduit par un comportement spatio-temporel réciproque de l'espace perceptif et c'est le nombre de degrés de liberté pris en compte dans cette interaction qui distingue les différents espaces.

Dans un référentiel physique classique, on distingue six degrés de liberté plus le temps. Trois degrés concerne les translations (X, Y, Z) et trois rotations autour de ces axes (Rx, Ry, Rz). Le temps n'est pas une dimension spatiale en soit, mais décrit l'évolution dynamique des degrés de liberté précédent. Il est à noter que nous distinguerons degrés de liberté (dimensions indépendantes entre deux corps) de la notion de degré de liaison (dimension reliée de façon rigide).

Compte tenu des différentes propositions de la littérature, nous identifions cinq types d'espace perceptifs accessibles par un dispositif de RA qui décrivent finalement le référentiel d'affichage :

- **World (W)**, désigne les espaces perceptifs centrés directement sur l'environnement réel. Les déplacements et l'orientation de l'utilisateur dans l'environnement réel modifient cette classe d'espace. A minima, deux translations et deux rotations sont nécessaires, ce qui constitue 4 degrés de liberté plus le temps. Idéalement, les six degrés de liberté peuvent être utilisés dans cette interaction.

- **Object (O)**, désigne les espaces perceptifs centrés sur un objet réel potentiellement mobile dans l'environnement de l'utilisateur. La différence entre cet espace et le précédent (W) réside dans la temporalité qui est partiellement indépendante de l'utilisateur. Par exemple, si l'utilisateur reste immobile, cet espace perceptif peut avoir un comportement dynamique propre non corrélé aux actions de l'utilisateur. De plus, la position absolue de l'utilisateur dans l'environnement n'est plus nécessaire mais seulement sa position et son orientation relative à l'objet. De quatre à six degrés de liberté sont nécessaires ici aussi.
- **Tag (T)**, désigne un cas particulier des espaces de type O. il s'agit ici des espaces perceptifs centrés sur un objet réel proche et, contrairement à l'espace O, manipulable directement par l'utilisateur. Ici aussi, les actions de l'utilisateur dans le monde ne sont pas prises en compte, seules, ses interactions directes avec le référent réel (Tag) sont nécessaires. Dans ce type d'espace, les trois translations sont indispensables ainsi qu'au moins deux rotations et ce, dans le temps. Les six degrés de liberté peuvent être utilisés pour cette interaction. Le terme de Tag est hérité d'Artoolkit qui fut pionnier dans l'exploitation de cette approche de la RA.
- **Surround (S)**, désigne les espaces perceptifs fixés par rapport à la position et à l'orientation du corps de l'utilisateur, telle une sphère virtuelle autour de lui. Les translations et rotations du corps sont solidaires de ce type d'espace, il y a donc six degrés de liaison. Seule l'orientation de son point de vue conditionne la visibilité des éléments virtuels. Par conséquent, de deux à trois degrés de liberté sont nécessaires (deux ou trois rotations) mais surtout aucune translation.
- **Head (H)**, désigne les espaces perceptifs fixés par rapport au point de vue de l'utilisateur. Quels que soient ses mouvements et son orientation, cet espace perceptif restera dans le champ de vision. Dans ce type d'espace, il doit y avoir six degrés de liaison pris en compte dans l'interaction, ou plus précisément, aucune dimension ne doit être libre.

Cependant, il est nécessaire de différencier la relation entre l'utilisateur et l'espace perceptif (contenant) de la relation entre l'utilisateur et un élément virtuel (contenu), car ces deux types de relations ne sont pas obligatoirement identiques. Par exemple, nous pouvons imaginer une application de RA utilisant un espace perceptif de type H (six degrés de liaison) dans lequel est affichée une boussole représentant le cap de l'utilisateur. La représentation graphique de la boussole est modifiée selon l'orientation de l'utilisateur ou autrement dit, la relation spatio-temporelle entre l'utilisateur et l'élément virtuel nécessite un degré de liberté, et, en l'occurrence, la rotation  $R_z$ . Cet exemple illustre bien qu'il existe deux niveaux de relation entre l'utilisateur et le système de RA, la relation avec les espaces perceptifs augmentés et la relation avec les éléments contenus dans ces espaces.

### 5.1.2 Axe 2 : Nature des éléments virtuels

Comme indiqué précédemment, la seule utilisation de la classification des espaces perceptifs employés ne suffit pas toujours à distinguer deux systèmes de RA. Les relations utilisateur-espace perceptif et utilisateur-élément virtuel étant distinctes, il est nécessaire de s'intéresser aussi à cette deuxième catégorie de lien. De plus, on peut facilement imaginer deux systèmes de RA affichant des éléments virtuels fondamentalement différents dans un espace perceptif identique (H par exemple). Ce second axe de la classification s'intéresse plus précisément à la nature des éléments virtuels affichés ainsi qu'à leur interaction avec l'utilisateur et l'environnement réel. Ce second axe de la taxonomie comprend quatre modalités, représentant différents types d'éléments virtuels dans l'environnement réel perçu. Ces modalités sont en fait la combinaison de deux propriétés, le degré d'intégration et le niveau d'abstraction.

- Le niveau d'intégration peut prendre deux valeurs, **Incrustation** ou **Intégration**. A l'instar de Fuchs et al. (2010), cette distinction désigne le niveau de réalisme dans l'intégration de l'élément virtuel dans l'environnement, et particulièrement, sa prise en compte des propriétés physiques de ce dernier. Par exemple, la gestion de l'occlusion par l'environnement réel ou l'utilisateur (sa main ou autre) est essentielle pour réellement donner à ce dernier la sensation que l'élément virtuel appartient à l'environnement réel. D'autres propriétés peuvent ajouter du réalisme, telle que la cohérence de la diffusion lumineuse, l'ombrage, les réflexions ou encore le rendu des textures tenant compte de la turbidité atmosphérique. En résumé, la modalité intégration tient compte de certains de ces facteurs contrairement à la simple incrustation en superposition de l'arrière plan réel sans interaction avec celui-ci.
- Le niveau d'abstraction désigne le type de représentation choisi pour l'élément virtuel et, plus précisément, désigne le lien avec son référent réel. Cette modalité peut prendre deux valeurs: **sémantique** ou **comportementale**. Dans le premier cas, le lien est seulement informationnel et ne tient pas compte des propriétés physiques du référent. Dans le cas contraire (comportemental), l'élément virtuel a une existence 3D propre et similaire à son référent réel. Sa configuration spatiale se modifie selon le point de vue de l'utilisateur et/ou selon le comportement du référent. Cela peut aussi se traduire par une capacité interactive avec l'utilisateur. La combinaison de ces deux critères permet de fournir un deuxième axe à la classification en tenant compte cette fois-ci du mode de représentation des éléments virtuels.

Il y a donc quatre niveaux dans cet axe, indiquant une augmentation de la complexité, du réalisme et/ou de l'interactivité des éléments virtuels affichés. Cependant, ces quatre modalités peuvent avoir une implication différente selon le type d'espace perceptif engagé, comme l'illustre le tableau suivant.

→ Niveau d'intégration →				
Espace perceptif	Incrustation sémantique	Incrustation comportementale	Intégration sémantique	Intégration comportementale
<b>W</b>	Abstrait, pas nécessairement dynamique ni affiché à la position du référent réel. (mais reste en lien). Juste superposé à la vue réelle.	Représentation analogique (isomorphique), avec un positionnement cohérent du référent réel. A une existence 3D propre. Se modifie selon le point de vue.	Abstrait, mais cohérent de l'environnement réel (occlusion, illumination, ombres, etc.).	Représentation analogique (isomorphique) et cohérente de l'environnement réel.
<b>O</b>	Abstrait, 2D pas nécessairement dynamique ni affiché à la position du référent réel. (mais reste en lien). Juste incrusté sur l'image.	Représentation analogique (isomorphique), avec un positionnement cohérent du référent réel. A une existence 3D propre. Se modifie selon le point de vue.	Abstrait, mais cohérent de l'environnement réel, occlusion, illumination, ombres, etc.	Représentation analogique (isomorphique) et cohérente de l'environnement réel.
<b>T</b>	Affichage d'un EV informationnel sans interaction.	Affichage d'EV interactif manipulable par l'utilisateur.	Affichage d'EV sans interaction mais prise en compte de l'environnement, (occlusion de la main ou autres)	Affichage d'EV interactif et prise en compte de l'environnement, (occlusion de la main ou autres)
<b>S</b>	Affichage d'un EV informationnel sans interaction.	Affichage d'EV interactif sans prise en compte de l'environnement réel (occlusion, etc.)	Affichage d'EV sans interaction mais prise en compte de l'environnement, (occlusion de la main ou autres)	Affichage d'EV interactif et prise en compte de l'environnement, (occlusion de la main ou autres)
<b>H</b>	Incrustation statique d'information sur le HUD d'avion par ex.	incrustation interactive (boussole, altimètre avion, radar BFT/RFT, etc.) Position fixe mais comportement dynamique lié à l'environnement réel	Profondeur d'affichage (HUD) gestion de l'occlusion entre l'EV et l'utilisateur.	Affichage d'EV interactif qui tient compte de l'arrière plan réel ou de l'occlusion intermédiaire

Tableau 5: Axe 2, classification des éléments virtuels (EV) selon l'espace perceptif employé.

### 5.1.3 Axe 3 : Nature du contexte d'utilisation

A l'instar des deux axes précédents, nous nous intéressons ici aussi à une relation spatio-temporelle, mais dans ce cas, entre le ou les utilisateurs et l'environnement réel perçu. Nous intégrons ici la proximité de l'environnement réel perçu, la dynamique de l'activité et le nombre d'utilisateur. Ces différents aspects du contexte d'emploi sont décisifs pour la conception et particulièrement sur les choix technologiques. De plus, cet axe est indépendant des précédents et constitue donc un critère supplémentaire permettant de classer les différents systèmes de RA possibles.

La proximité de l'environnement perçu peut prendre deux valeurs, **Immédiat** ou **distant**. Le premier cas désigne les situations les plus répandues où le système de RA permet l'augmentation de l'environnement proche de l'utilisateur, c'est-à-dire là où se situe réellement son corps. Dans le deuxième cas, il s'agit des situations de télémanipulation de robot, drone ou tout autre système permettant d'agir et de percevoir dans un environnement réel mais distant de l'utilisateur. Dans ce type d'usage, le couplage sensori-moteur de l'utilisateur est complètement instrumenté, que se soit en action ou en perception. La réalité perçue ne correspond plus à l'environnement naturel de l'utilisateur, il y a un déplacement du point de vue vers une position exocentrique.

- La dynamique de l'activité s'intéresse à la capacité de mobilité de l'utilisateur dans l'environnement perçu. Ce dernier peut être **statique** ou **mobile**, ce qui se traduit par un environnement dynamique ou non. Selon le contexte, les technologies employées peuvent être totalement différentes et particulièrement en termes de tracking et de recalage. De plus, dans une situation de mobilité, l'activité de l'utilisateur ne doit pas être entravée par le système et doit notamment pouvoir garder au maximum sa liberté de mouvement et de déplacement, ce qui contraint encore une fois la conception.

- Le mode d'utilisation désigne le fait que le système puisse être utilisé par plusieurs personnes simultanément ou non. La plupart des applications de RA sont **Mono-utilisateur** mais on observe dans la littérature un intérêt croissant pour les systèmes **multi-utilisateurs** et toutes les problématiques sous-jacentes aux systèmes de RA collaboratifs. Dans ce cas là, le partage d'information, de point de vue et d'interaction peut être profondément différent d'un système mono-utilisateur.

#### 5.1.4 Axe 4 : Type de restituteur employé

Ce quatrième et dernier axe de la classification est différent dans le sens où, contrairement aux précédents, il traite ici d'un critère purement technologique pour différencier les systèmes de RA. Comme indiqué auparavant, le restituteur employé dans un dispositif de RA est la brique technologique impactant le plus directement la perception et, que se soit en terme de « réalité » augmentée ou de « perception » augmentée, cette dimension sera centrale dans l'expérience utilisateur.

Il existe effectivement d'autres taxonomies intégrant une classification des restituteurs mais dans la plupart des cas, soit elles sont trop restreintes (Milgram et al., 1994) et ne permettent pas d'intégrer de nouveaux dispositifs disponibles maintenant, soit trop larges (Normand et al., 2012) et ne possèdent pas une capacité de discrimination suffisante pour rendre compte de différences importantes entre plusieurs types de restituteurs. Nous les classons selon les trois critères suivants :

- La configuration :

Ce facteur décrit la forme du restituteur, sa conception mécanique impliquant une utilisation particulière et peut prendre trois valeurs différentes :

- **HMD** (*Head Mounted Display*) : désigne les restituteurs qui sont directement fixés sur la tête ou un casque. Il y a un lien physique rigide entre le point de vue de l'utilisateur et le dispositif.

- **HHD** (*Hand Held Display*) : désigne les restituteurs qui sont tenus à la main par l'utilisateur et/ou qui peuvent se fixer sur ses vêtements et équipements transportés. Il y a un lien physique relatif entre l'utilisateur et ce type de restituteur, dans le fait que l'utilisateur maîtrise ce lien et peut volontairement déplacer son point de vue indépendamment du système.

- **Déporté** : désigne les restituteurs qui sont directement intégrés dans un système plus global (comme un véhicule ou une plateforme de tir par exemple) et qui ne sont pas fixés ni portés par l'utilisateur. Cela regroupe aussi les systèmes disposés directement dans l'environnement (Magic Mirror, SAR, etc.). Il n'y a pas de lien physique rigide entre l'utilisateur et ce type de restituteur.

- La visualisation :

Ce facteur indique la façon dont l'utilisateur peut percevoir (ou non) l'environnement « à travers » le restituteur, et peut prendre quatre valeurs :

- **Optique** transparent (*O-ST* ou *optical see-through*) : désigne les restituteurs qui permettent à l'utilisateur de voir directement (comme à travers une vitre) l'environnement réel présent derrière l'afficheur.

- **Vidéo** transparent (*V-ST* ou *video see-through*) : désigne les reconstituteurs qui permettent à l'utilisateur de voir l'environnement réel derrière l'afficheur au travers d'un traitement vidéo. D'un côté, une (ou deux) caméra filme l'environnement et le retransmet en temps réel sur un écran de l'autre côté pour restituer à l'utilisateur la perception de son environnement.
- **Immersif** (ou IMM) : désigne les reconstituteurs opaques, qui ne permettent pas à l'utilisateur de voir l'environnement réel à travers l'écran. C'est par exemple le cas des écrans d'ordinateur ou de télévision classiques.
- **Projecteur** (*PROJ* ou *projection based display*) : désigne les systèmes permettant de projeter directement les éléments virtuels sur l'environnement ou les objets réels.

- La restitution :

Ce facteur indique si les informations produites par le système sont affichées devant un œil ou les deux yeux de l'utilisateur. Ce facteur peut prendre trois valeurs :

- **Monoculaire** : désigne les reconstituteurs affichant les informations devant un seul œil.
- **Bi-oculaire** : désigne les reconstituteurs affichant la même image devant les deux yeux.
- **Binoculaire** (ou **stéréoscopique**) : désigne les systèmes qui affichent une image différente devant chaque œil, (Ce qui est le cas de la vision naturelle) avec un léger décalage de point de vue.

La combinaison de ces trois facteurs permet de fournir un moyen de classier n'importe quel reconstituteur d'information visuel pouvant être utilisé dans un système de RA, nous pouvons distinguer 36 catégories de reconstituteur.

Restitution		Monoculaire			Bi-oculaire			Stéréoscopique		
Configuration		HMD	HHD	Dép.	HMD	HHD	Dép.	HMD	HHD	Dép.
Visu.	O-ST	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V-ST	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	IMM	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	PROJ	28	29	30	31	32	33	34	35	36

Tableau 6: Classification des reconstituteurs visuels de RA.

Un reconstituteur de type 1 sera par exemple le Lumus PD-18, c'est-à-dire un reconstituteur HMD monoculaire *optical see-through* (voir Figure 32). Un reconstituteur du type 24 est par exemple un écran LCD classique d'ordinateur ou intégré dans un véhicule c'est-à-dire un reconstituteur déporté bi-oculaire (la même image pour les deux yeux) permettant, par exemple, la téléopération d'un drone (Calhoun et al., 2005).

Le système présenté dans le projet Wuw ou Sixth sense (Mistry et al., 2009), emploie un restituteur de type 32, soit un mini vidéoprojecteur fixé sur le corps (HHD) de l'utilisateur projetant une image identique pour les deux yeux (Bi-oculaire). A l'inverse, il n'existe pas, à notre connaissance, d'exemples dans la littérature de systèmes de RA s'appuyant sur un restituteur de type 28, 29 ou 30.

Il est difficile de comparer directement deux restituteurs, tant leurs différences sont importantes. Cependant, une grande partie des avantages du PD-18, par exemple, vis-à-vis de l'écran LCD d'ordinateur n'est pas liée à ses caractéristiques propres, mais au fait qu'il soit HMD ou O-ST ou monoculaire. Grâce à cette classification, il devient donc plus évident de pouvoir comparer les avantages et inconvénients d'un HMD par rapport à un déporté, ou d'un monoculaire par rapport à un bi-oculaire. D'une certaine manière, cette classification fournit un cadre d'analyse et de comparaison des différents types de restituteur de RA.

La section suivante présente une application de cette taxonomie pour l'évaluation théorique des restituteurs afin de guider le choix d'un dispositif pour la conception d'un système de RA pour le fantassin.

*Nota : La taxonomie WOTSH&R a été enrichie ultérieurement à la réalisation de cette étude et notamment sur la classification des restituteurs. En effet, les restituteurs de type « projecteur » ont été ajoutés au facteur « visualisation » que très récemment. Par conséquent, cet aspect n'a pas été traité durant cette étude.*

## 5.2 APPLICATION DE LA CLASSIFICATION WOTSH&R

L'analyse présentée ici a été réalisée dans le cadre d'un projet industriel (Sagem-DGA) dont l'objectif était de réaliser une étude amont théorique sur la réalité augmentée pour le fantassin. Un état de l'art complet des technologies sous-jacentes à la RA a, entre autre, été effectué et la partie exposée, ici, présente l'analyse ergonomique théorique associée.

L'objectif de cette analyse est de classifier les différents types de restitueurs, afin de comparer les avantages et inconvénients fondamentaux de chaque catégorie de système. En effet, comme décrit précédemment, certains avantages (et inconvénients) d'un restituteur ne sont pas spécifiques au produit, mais à tous les produits du même type. Le principe de la classification est justement d'identifier les avantages et les inconvénients propres à chaque type de restituteur, afin de se détacher du produit en lui-même et donc de pouvoir orienter le choix non pas vers un produit spécifique mais vers une catégorie de restituteur. Par ailleurs, la liste des critères de comparaison appliquée, ici, a été définie à partir de l'analyse de la littérature. Ils abordent les différents aspects de l'interaction homme-machine en couvrant le domaine technologique, humain et celui de l'activité utilisateur. Ces critères ne sont pas complètement dissociables, il y a une interdépendance forte entre plusieurs catégories.

Les analyses comparatives suivantes prennent en compte les avantages et les inconvénients de catégories de produits, mais au sein d'une même catégorie, les caractéristiques techniques d'un système peuvent varier d'un modèle à l'autre, et donc influencer les résultats. Cette analyse permet d'orienter le choix parmi le vaste nombre de restitueurs possibles, mais une analyse comparative précise entre plusieurs produits similaires est nécessaire pour effectuer le meilleur choix pour un usage donné.

### 5.2.1 Méthode

#### 5.2.1.1 *Classification des restitueurs*

Les différents types de restitueurs ont été organisés selon la classification précédente. Pour chacun des facteurs identifiés (restitution, configuration, visualisation) une analyse comparative est menée pour identifier les forces et faiblesses de chacune de ces catégories.

#### 5.2.1.2 *Critères de comparaison*

Pour cette analyse, 29 critères ont été identifiés pour comparer les différentes catégories de restitueurs. Ils peuvent être organisés en trois domaines d'intérêt, (technologique, humain et activité) qui sont eux-mêmes divisés en plusieurs sous catégories. Les tableaux ci-dessous décrivent les critères et leurs significations.

Catégorie	Critère	Signification
-----------	---------	---------------

Catégorie	Critère	Signification
Aspects matériels	Maturité et coût	Se réfère au degré de maturité technologique du produit, s'il est disponible sur le marché et son placement tarifaire par rapport aux autres systèmes.
	Robustesse	Décrit si le produit est fragile, s'il présente des risques de casse ou de dégradation importante.
	Taille et poids	Décrit l'encombrement du système
	Consommation	Décrit la consommation énergétique nécessaire par rapport aux autres systèmes.
Qualité graphique	Contraste	Se réfère au taux de contraste que le système peut produire.
	Couleurs	Décrit la qualité et le nombre de couleurs que le système peut fournir.
	Luminance	Se réfère à la luminance des informations que le système peut afficher.
	Latence/rafraîchissement	Se réfère au temps nécessaire pour générer une image et au nombre d'images par seconde que le système peut afficher
	Champ de vision (augmenté)	Se réfère à la surface angulaire sur laquelle le système peut afficher de l'information.
	Résolution	Se réfère au nombre de pixels (l'unité d'affichage) que le restituteur possède.
Possibilités d'affichage	Texte et symbologie	Se réfère à la capacité du système à afficher des caractères alphanumériques et des symboles
	conformalité	Se réfère à la capacité du système à pouvoir afficher des informations géolocalisées directement dans l'environnement réel.
	Vidéo et IHM complexe	Se réfère à la capacité du système à afficher des vidéos et/ou des IHM graphiques complexes dans de grandes résolutions.

Tableau 7 : Organisation des critères pour le domaine technologique

<b>Catégorie</b>	<b>Critères</b>	<b>Signification</b>
Aspects physiologiques	Troubles proprioceptifs	Se réfère à la capacité du système à produire (ou éviter) des effets secondaires chez l'utilisateur (nausée, vertige, etc.)
Aspects perceptifs	Occlusion visuelle	Se réfère au risque que le système puisse masquer des éléments de l'environnement réel.
	Visibilité et lisibilité	Se réfère à la capacité du système à afficher des informations lisibles quelque soit l'environnement.
	Champ de vision (total)	Se réfère à la capacité du système à modifier (augmenter ou réduire) le champ visuel normal de l'utilisateur.
	Perception de la profondeur	Se réfère à la capacité du système à permettre à l'utilisateur de percevoir la profondeur et les distances des éléments réels et virtuels.
Aspects cognitifs	Basculement attentionnel	Ce réfère à la capacité du système à limiter (ou augmenter) le basculement attentionnel de l'utilisateur entre les informations affichées et son environnement réel
	Charge cognitive	Se réfère à la capacité du système à réduire (ou augmenter) la charge cognitive de l'utilisateur pour la consultation des informations affichées.
Aspects physiques	Gêne physique	Se réfère à la capacité du système à ne pas entraver les capacités motrices de l'utilisateur (surcharge, utilisation des mains, etc.)
	Mouvement de la tête et des yeux	Se réfère à la capacité du système à limiter le nombre de mouvements des yeux et de la tête de l'utilisateur.
	Réglages et ajustement	Se réfère à la capacité du système à être facilement ajusté pour pouvoir l'utiliser dans de bonnes conditions.

Tableau 8 : Organisation des critères pour le domaine humain

<b>Catégorie</b>	<b>Critère</b>	<b>Signification</b>
Compatibilité avec l'activité	Compatibilité avec les équipements	Se réfère à la capacité du restituteur à s'intégrer ou ne pas gêner l'utilisation des autres équipements.
	Furtivité	Se réfère à la capacité du système à ne pas nuire à la furtivité (visuelle) de l'utilisateur.
	Usage nocturne	Se réfère à la capacité du système à pouvoir être utilisé de nuit.
	Usage collaboratif	Se réfère à la capacité du système à pouvoir être utilisé par plusieurs utilisateurs simultanément.
	Usage en mobilité	Se réfère à la capacité du système à pouvoir être utilisé quand l'utilisateur se déplace.
	Détection de cible	Se réfère à la capacité du système à pouvoir être utilisé pour une tâche de détection de cibles.

Tableau 9 : Organisation des critères pour le domaine de l'activité

Ces 29 critères permettent d'aborder l'analyse des restituteurs pour la RA selon plusieurs angles d'approche issus de domaines différents. Cependant, ces catégories de critères permettent seulement de les organiser et ne sont pas figées. Il y a par ailleurs une forte interdépendance entre tous ces critères.

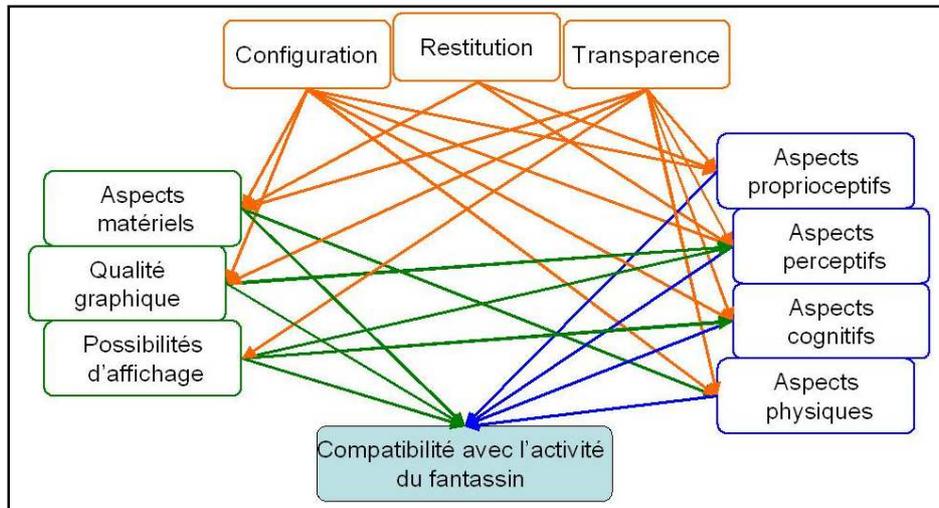


Figure 31: Interdépendance des critères de comparaison.

Le schéma précédent présente l'impact des différentes catégories de critères sur les autres et permet de mettre en évidence que les trois facteurs de comparaison (en orange) ont une influence sur quasiment toutes les autres catégories. De plus, on s'aperçoit que les critères du domaine technologique (en vert) ont un impact direct sur l'activité du fantassin, mais aussi sur les Facteurs Humains.

### 5.2.2 Résultats

A partir des trois facteurs de la classification précédente, nous avons synthétisé pour chaque critère, les avantages ou inconvénients identifiés dans la littérature ou observés de façon empirique dans le cadre de projets internes. Autrement dit, nous avons comparé les avantages et inconvénients de chaque valeur de ces facteurs (HMD, HHD, déporté pour le facteur de configuration par ex.) selon les 29 critères. Comme indiqué précédemment, les caractéristiques propres d'un modèle de HMD peuvent profondément différer d'un autre, c'est pour cette raison que nous proposons une fourchette de notation répartie entre gain potentiel et risque potentiel. Le barème utilisé est le suivant :

<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Fort risque	Risque léger	Pas d'influence	Gain potentiel léger	Gain potentiel important

Tableau 10 : Barème utilisé pour l'évaluation

La notation est donnée à titre indicatif, et ne reflète pas le résultat d'un test empirique quelconque. En effet, une note de « 0 » indique que le facteur étudié n'a pas d'impact sur ce critère ou n'apporte rien de positif. Une note de 1 ou 2 indique que le facteur étudié peut potentiellement favoriser le critère évalué. Inversement, une note de -1 ou -2 indique un risque potentiel.

Les résultats présentés ci-après ne sont que la synthèse des analyses effectuées sous la forme d'un tableau de notation. La liste des avantages et inconvénients identifiés est présentée en annexe 1. Les critères sont regroupés par domaine d'intérêt et chaque tableau présente un domaine.

### 5.2.2.1 Comparaison du facteur de configuration

Ce facteur de configuration (ou de forme) décrit comment le restituteur est positionné pour être consulté par l'utilisateur. Dans le cas des HMD, le restituteur est fixé sur la tête de l'utilisateur soit par un système de fixation spécifique, soit intégré à un autre équipement de tête déjà présent (casque de protection, lunettes de vision nocturne, etc.). C'est la configuration privilégiée des restituteurs de réalité augmentée, car ils permettent de positionner les informations directement dans le champ visuel de l'utilisateur. Dans le cas des HHD, le restituteur est maintenu à la main par l'utilisateur ou fixé sur son corps ou ses équipements. Avec la miniaturisation des systèmes électroniques, ce type de produit a envahi le marché grand public (téléphone portable, PDA, tablette LCD, etc.). Enfin, les restituteurs déportés sont les plus anciens et les plus répandus. Ce sont, par exemple, les écrans intégrés dans un véhicule (ordinateur de bord, interface de tourelleau de tir télé-opéré, périscope ou épiscopes dans un véhicule blindé, etc.). Ce sont généralement des technologies d'écran maîtrisées, fournissant une bonne qualité d'image et une grande fiabilité.

#### Domaine technologique :

	Type	HMD		HHD		Déporté	
	Critères	Gain	Risque	Gain	Risque	Gain	Risque
<b>Aspect matériel</b>	Maturité et coût	1	-2	1	-2	2	-2
	Robustesse	0	-2	2	-1	2	0
	Consommation d'énergie	2	0	0	-1	0	-2
	Taille et poids	2	-2	1	-2	0	-2
<b>Qualité graphique</b>	Contraste	0	-1	2	-1	2	0
	Luminance	1	-1	2	-1	2	0
	Couleur	0	-1	2	-1	2	0
	Latence / rafraîchissement	0	0	0	0	0	0
	Résolution	0	-2	2	0	2	0
	Champ de vision augmenté	2	-2	1	-2	2	-1
<b>Capacité d'affichage</b>	Texte et symbologie	2	0	2	0	2	0
	Conformalité	2	0	2	-2	2	-1
	Vidéo et IHM complexe	2	-2	2	-2	2	0
<b>Total</b>		<b>14</b>	<b>-15</b>	<b>19</b>	<b>-15</b>	<b>20</b>	<b>-8</b>

Tableau 11 : Bilan des critères technologiques pour les différentes configurations

Les reconstituteurs déportés obtiennent les meilleurs scores et présentent le moins de risque potentiel. Ce résultat s'explique par la maturité de ce type de technologie qui offre une excellente qualité d'affichage. Les HMD et les HHD étant des technologies portables, ils présentent un certain nombre de limitations et de risques technologiques qui devraient être résolus dans les années à venir.

**Domaine Facteur Humain :**

	Type	HMD		HHD		Encastré	
		Gain	Risque	Gain	Risque	Gain	Risque
<b>Aspects physiologiques</b>	Troubles proprioceptifs	0	-2	1	-1	2	-1
<b>Aspects perceptifs</b>	Occlusion visuelle	2	-2	2	-1	2	0
	Visibilité et lisibilité	2	-1	1	-2	1	0
	Champ de vision total	2	-2	2	0	0	0
	Perception de la profondeur	0	0	0	0	0	0
<b>Aspects cognitifs</b>	Basculement attentionnel	2	-1	0	-2	0	-2
	Charge cognitive	2	0	0	-1	0	-1
<b>Aspects physiques</b>	Gêne physique	2	-2	0	-2	2	-1
	Mouvement de la tête et des yeux	2	0	1	-1	1	-2
	Réglage et ajustement	0	-2	1	-1	2	0
<b>Total</b>		<b>14</b>	<b>-12</b>	<b>8</b>	<b>-11</b>	<b>12</b>	<b>-7</b>

Tableau 12 : Bilan des critères Facteurs humains pour les différentes configurations

D'un point de vue Facteur Humain, ce sont les HMD qui obtiennent le meilleur score. Leur avantage majeur est de permettre d'afficher les informations directement dans le champ visuel des utilisateurs tout en libérant l'usage des mains. Cependant, ils présentent un niveau de risque élevé, particulièrement au niveau perceptif et proprioceptif. Ces problématiques sont centrales dans la conception d'un HMD. Les reconstituteurs encastrés obtiennent un bon score aussi, mais n'offrent pas les mêmes avantages. Ils s'adressent à des contextes d'usage différents. Enfin, les HHD offrent un bon compromis entre la stabilité et la facilité d'utilisation des encastrés tout en permettant l'utilisation en mobilité des HMD.

## Compatibilité activité :

	Type	HMD		HHD		Encastré	
		Gain	Risque	Gain	Risque	Gain	Risque
<b>compatibilité activité</b>	Compatibilité équipements	2	0	0	-2	2	-1
	Furtivité	2	0	1	-2	2	0
	Usage nocturne	2	-2	1	-1	2	0
	Usage collaboratif	0	-2	2	0	2	0
	Usage en mobilité/vibration	2	-1	1	-2	1	-2
	Détection de cibles	2	-1	1	0	1	0
<b>Total</b>		<b>10</b>	<b>-6</b>	<b>6</b>	<b>-7</b>	<b>10</b>	<b>-3</b>

Tableau 13 : Bilan des critères sur l'activité pour les différentes configurations

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus précédemment car les avantages et inconvénients, identifiés dans le domaine des Facteurs Humains, impactent directement l'activité de l'utilisateur.

### 5.2.2.2 Comparaison du facteur de restitution

Les restituteurs monoculaires sont les plus répandus dans les systèmes militaires. Cependant, ils ne sont pas exempts de défauts. La vision naturelle repose sur le principe de stéréoscopie, c'est-à-dire que chaque œil perçoit une image légèrement différente de l'autre. Cette différence est provoquée par la distance séparant la position de chaque œil et, c'est justement grâce à ce décalage, que nous pouvons apprécier une distance, percevoir le volume d'un objet, ou percevoir la profondeur. Cependant, le système visuel humain ne se base pas uniquement sur ce seul indice visuel pour percevoir en 3 dimensions, il existe un ensemble d'autres indices visuels monoculaires permettant de confirmer l'inférence neurocognitive de profondeur. Entre ces deux types de restitution se trouve le bi-oculaire, qui, lui, consiste à présenter la même image ou les mêmes informations aux deux yeux. Ce principe se rapproche alors plus de notre fonctionnement naturel, mais sans en apporter tous ses avantages (pas de stéréoscopie).

## Domaine technologique :

	Type	Monoculaire		bi-oculaire		binoculaire	
		Gain	risque	Gain	risque	Gain	risque
<b>Aspect matériel</b>	Maturité et coût	2	0	1	0	0	-2
	Robustesse	1	0	0	0	0	0
	Consommation d'énergie	2	0	0	-1	0	-2
	Taille et poids	2	0	1	-1	0	-2
<b>Qualité graphique</b>	Contraste	0	0	0	0	0	0
	Luminance	0	0	0	0	0	0
	Couleur	0	0	0	0	0	0
	Latence / rafraîchissement	0	0	0	0	0	0
	Résolution	0	0	0	0	0	0
	Champ de vision augmenté	0	-2	1	0	2	0
<b>Capacité d'affichage</b>	Texte et symbologie	0	0	0	0	0	0
	Conformalité	0	-1	0	-1	2	0
	Vidéo et IHM complexe	0	-1	2	0	2	0
<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>-4</b>	<b>5</b>	<b>-3</b>	<b>6</b>	<b>-6</b>

Tableau 14 : Bilan des critères technologiques pour les types de restitution

Les résultats obtenus par les trois types de reconstituteurs sont très proches avec un léger avantage aux monoculaires. Dans le cas des HMD, les monoculaires sont les plus petits et les moins coûteux, mais ils ont l'inconvénient majeur de limiter le champ de vision augmenté (environ 30°). Par ailleurs, ce tableau met en évidence que le facteur du type de restitution n'impacte pas la qualité graphique (mis à part le champ de vision). Au niveau des capacités d'affichage, les reconstituteurs monoculaires sont les plus limités, car en l'absence de stéréoscopie et d'un recalage précis, les informations de conformité sont limitées. De plus, la lecture d'une vidéo ou l'utilisation d'une IHM graphique, sur une durée prolongée, peut s'avérer difficile avec un seul œil, ce qui n'est pas le cas avec les deux autres catégories de reconstituteur.

L'avantage majeur des restituteurs binoculaires est de permettre la vision stéréoscopique fournissant une perception de la profondeur intuitive, facilitant l'interprétation d'informations de conformalité. De plus, les systèmes utilisant les deux yeux offrent donc un champ de vision augmentée plus important.

**Domaine Facteurs Humains :**

	Type	Monoculaire		Bi-oculaire		Binoculaire	
		Gain	risque	Gain	risque	Gain	risque
<b>Aspects physiologiques</b>	Troubles proprioceptifs	0	-2	0	-1	0	-2
<b>Aspects perceptifs</b>	Occlusion visuelle	2	0	2	-2	0	-2
	visibilité et lisibilité	0	-1	1	0	1	0
	Champ de vision total	2	0	2	-2	0	-2
	Perception de la profondeur	1	-2	0	-2	2	0
<b>Aspects cognitifs</b>	Basculement attentionnel	1	-1	1	0	2	0
	Charge cognitive	0	-1	1	0	1	0
<b>Aspects physiques</b>	Gêne physique	0	0	0	0	0	0
	Mouvement de la tête et des yeux	0	-1	0	0	0	0
	Réglage et ajustement	1	0	0	-2	0	-2
<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>-8</b>	<b>7</b>	<b>-9</b>	<b>6</b>	<b>-8</b>

Tableau 15 : Bilan des facteurs humains pour les types de restitution

D'un point de vue Facteur Humain, les trois types de restituteurs ont des résultats proches mais ont des avantages et inconvénients différents. Les systèmes monoculaires, n'affichant les informations que devant un seul œil, permettent de libérer l'autre pour continuer à percevoir l'environnement réel. De plus, ces systèmes sont plus simples à ajuster. Mais à l'instar des binoculaires, les systèmes affichant une information différente devant chaque œil ont un risque plus élevé de produire des troubles proprioceptifs et perceptifs. Les systèmes utilisant les deux yeux facilitent l'accès aux informations et donc réduisent le temps de basculement attentionnel et la charge cognitive qui en découle.

## Domaine compatibilité activité :

	Type	Monoculaire		Bi-oculaire		Binoculaire	
		Gain	Risque	Gain	Risque	Gain	Risque
<b>compatibilité activité</b>	Compatibilité avec les équipements	1	0	0	0	0	0
	Furtivité	0	0	0	0	0	0
	Usage nocturne	0	-2	1	-1	2	0
	Usage collaboratif	0	-2	0	0	0	-2
	Usage en mobilité/vibration	2	0	0	0	0	0
	Détection de cibles	0	-1	1	0	2	0
<b>Total</b>		<b>3</b>	<b>-5</b>	<b>2</b>	<b>-1</b>	<b>4</b>	<b>-2</b>

Tableau 16 : Bilan des critères sur l'activité pour les types de restitution

Les restituteurs binoculaires présentent le meilleur potentiel de gain opérationnel, car ils améliorent la perception du relief et des obstacles en vision nocturne, ainsi que la détection de cibles. Cependant, comme les systèmes monoculaires, ils sont mono-utilisateur et ne permettent donc pas la consultation par plusieurs utilisateurs simultanément.

### 5.2.2.3 Comparaison du facteur de visualisation

Les technologies de restitution visuelle ont historiquement débuté par le développement d'afficheurs immersifs (non transparents). Depuis la création du cinéma, jusqu'aux mini-écrans plats de nos téléphones portables, ce domaine de recherche n'a cessé d'évoluer et ne semble pas prêt de s'arrêter. Les restituteurs transparents ont, pour leur part, un historique beaucoup plus récent (vers les années 1960 pour les HUD des pilotes d'avion de chasse) mais sont les restituteurs privilégiés de la réalité augmentée.

En effet, l'objectif de ce domaine est de pouvoir afficher directement des informations dans le champ de vision de l'utilisateur. Par conséquent, l'évolution de ces technologies see-through n'a réellement débuté qu'avec les progrès de la recherche en réalité virtuelle. Même si théoriquement les restituteurs transparents semblent les mieux placés pour ce type d'application, leurs limitations technologiques permettent de trouver encore certains avantages aux restituteurs immersifs.

## Domaine technologique :

	type	OST		VST		immersif	
		Gain	Risque	Gain	Risque	Gain	Risque
<b>Aspect matériel</b>	Maturité et coût	1	0	0	-2	2	0
	Robustesse	0	-1	0	0	2	0
	Consommation d'énergie	2	0	0	-2	0	-1
	Taille et poids	2	0	0	-2	1	0
<b>Qualité graphique</b>	Contraste	0	-2	2	0	2	0
	Luminance	0	-1	2	-1	2	0
	Couleur	0	-2	2	0	2	0
	Latence / rafraîchissement	2	0	0	-2	0	-1
	Résolution	2	0	0	-1	0	0
	Champ de vision augmenté	0	0	1	0	1	0
<b>Capacité d'affichage</b>	Texte et symbologie	1	-1	2	0	2	0
	Conformalité	2	-2	2	0	1	-1
	Vidéo et IHM complexe	0	-2	2	0	2	0
<b>Total</b>		<b>12</b>	<b>-11</b>	<b>13</b>	<b>-8</b>	<b>17</b>	<b>-3</b>

Tableau 17 : Bilan des critères technologiques pour les types de transparence

Les reconstituteurs immersifs obtiennent évidemment le meilleur score dans le domaine technologique, car ce sont les systèmes les plus matures, les mieux maîtrisés et offrant la meilleure qualité d'affichage. Les systèmes vidéos see-through arrivent en seconde position car ils possèdent la plupart des avantages des immersifs, mais présentent aussi plus de risques. Leur inconvénient majeur est le temps de latence et le taux de rafraîchissement nécessaires aux traitements vidéos.

Les reconstituteurs optiques transparents obtiennent un résultat très proche des vidéos see-through car ils ont des qualités matérielles indéniables, mais sans offrir les possibilités et qualité d'affichage des systèmes vidéos ou immersifs.

## Domaine facteurs humains :

	Type	OST		VST		immersif	
		Gain	risque	Gain	risque	Gain	risque
<b>Aspects physiologiques</b>	Troubles proprioceptifs	2	0	0	-2	0	-2
<b>Aspects perceptifs</b>	Occlusion visuelle	2	-1	0	-2	0	-2
	visibilité et lisibilité	1	-2	2	-1	2	0
	Champ de vision total	2	0	2	-2	2	-2
	Perception de la profondeur	2	0	2	-1	2	0
<b>Aspects cognitifs</b>	Basculement attentionnel	1	-1	2	0	0	-2
	Charge cognitive	1	-1	2	0	0	-1
<b>Aspects physiques</b>	Gêne physique	1	0	1	0	0	-1
	Mouvement de la tête et des yeux	2	0	2	0	0	-2
	Réglage et ajustement	0	-1	0	-1	1	0
<b>Total</b>		<b>14</b>	<b>-6</b>	<b>13</b>	<b>-9</b>	<b>7</b>	<b>-9</b>

Tableau 18: Bilan des critères Facteurs humains pour les types de visualisation.

D'un point de vue Facteur Humain, la tendance s'inverse, les reconstituteurs optiques transparents contournent la plupart des risques et inconvénients des autres types de système. La conservation de la perception naturelle de l'environnement est leur avantage majeur. Concernant les reconstituteurs VST, ils acquièrent les avantages des systèmes transparents (affichage d'information directement dans le champ visuel), mais conservent un niveau de risque élevé dû encore une fois à la latence impactant fortement le confort d'utilisation.

Enfin, les systèmes immersifs obtiennent un score moyen, équilibrés entre risque et gain. D'un point de vue perceptif, ils apportent le confort de lecture dû à leur grande qualité d'affichage, mais selon le type de configuration (HMD ou non), ils peuvent fortement impacter la mobilité et les capacités cognitives des utilisateurs.

**Domaine compatibilité activité :**

	Type	OST		VST		immersif	
		Gain	Risque	Gain	Risque	Gain	Risque
<b>compatibilité activité</b>	Compatibilité avec les équipements	1	0	1	0	0	-1
	Furtivité	0	-1	1	0	1	-1
	Usage nocturne	2	0	2	-1	0	-1
	Usage collaboratif	1	-1	2	0	2	0
	Usage en mobilité/vibration	2	0	1	-2	0	-2
	Détection de cibles	2	0	1	0	1	0
<b>Total</b>		<b>8</b>	<b>-2</b>	<b>8</b>	<b>-3</b>	<b>4</b>	<b>-4</b>

Tableau 19 : Bilan des critères sur l'activité pour les types de visualisation.

Les systèmes OST et VST obtiennent des scores équivalents démontrant l'intérêt des restituteurs transparents même s'ils n'ont pas les mêmes avantages. Les restituteurs optiques impactent moins la mobilité des utilisateurs et permettent plus facilement la détection de nouvelles cibles non indicées. Les restituteurs immersifs obtiennent le score le plus bas et le niveau de risque le plus élevé. Ils impactent fortement la mobilité des utilisateurs et n'apportent pas de gain opérationnel par rapport aux restituteurs transparents, mis à part la possibilité d'un usage collectif sur le même dispositif (sauf HMD).

### 5.2.3 Discussion et perspectives

Cette analyse a permis d'identifier les avantages et inconvénients majeurs des différents types de restituants potentiellement applicables aux systèmes de RA. Cette méthodologie a notamment permis d'identifier les restituants HMD monoculaire *optical see-through* comme étant de bons candidats pour une application dans le contexte du fantassin débarqué.

En effet, le facteur de forme (HMD) fournit l'avantage de libérer les mains du soldat pour pouvoir utiliser ses armes et équipements annexes. De plus, les informations tactiques sont consultables très rapidement d'un simple mouvement oculaire, sans nécessiter le déploiement d'un équipement tierce. Enfin, les informations de conformalité (corrélée à l'environnement réel) sont disposées directement dans son champ de vision et en accord avec le point de vue de l'utilisateur.

Le facteur de restitution (monoculaire) permet de limiter les risques de troubles physiologiques (*cybersickness*) dû à la réduction du champ visuel naturel de l'utilisateur. De plus, la libération d'un œil permet l'usage d'une arme équipée d'une lunette de tir.

Le facteur de visualisation (*optical see-through*) réduit lui aussi les risques de troubles physiologiques potentiellement provoqués par la latence d'affichage vidéo. De plus, l'utilisateur conserve une perception directe et naturelle de son environnement extérieur même en cas de défaillance du système.

Cependant, cette étude a aussi permis d'identifier certains risques ou limites à ce type de restituteur qui devront être pris en compte lors de la conception. En effet, le facteur de forme implique que la masse du dispositif est uniquement supportée par la tête et le cou du soldat. Un soin spécifique doit être apporté quant à son intégration dans un système fantassin (casque ou autre). Et particulièrement les aspects de répartition des masses et de confort de port. Le facteur de restitution implique une perception non naturelle des informations, provoquée par l'affichage devant un seul des deux yeux. Cela peut induire des troubles perceptifs liés au conflit entre les deux sources visuelles qui sont différentes. De plus, les notions de distance et de relief des éléments virtuels peuvent aussi être dégradées par ce type de dispositif et notamment à courte distance.

Enfin, le facteur de visualisation implique une qualité graphique moindre que les autres types de technologie. Par conséquent, la lisibilité des informations affichées peut être dégradée selon l'environnement lumineux du fantassin. De plus, ces systèmes optiques produisent une image collimatée à une distance fixe (généralement à l'infini théorique) qui peut ne pas être focalisée à la même distance que les éléments réels perçus. Cela crée donc deux plans focaux différents (un domaine proche et un lointain) dont l'utilisateur devra s'accommoder. Cela pourrait potentiellement entraîner des effets secondaires (fatigue oculaire, nausées, maux de tête).

Plus globalement, cette étude a permis de valider un axe de la taxonomie WOTSH&R : la catégorisation de tous les restituants actuellement existants mais pas seulement.

En effet, certaines « cases vides » de cette classification permettent d'identifier des produits qui n'existent pas encore sur le marché et ainsi d'orienter la conception de nouveaux systèmes. Cette classification semble donc être un axe solide pour la taxonomie globale proposée.

Enfin, cette étude a permis d'aboutir à la sélection de critères pertinents pour la comparaison mais aussi pour l'évaluation de système de RA. Ces critères ont d'ailleurs servi à concevoir un plan d'évaluation ergonomique des systèmes de RA qui a été livré dans le cadre de ce projet (voir Annexe 2). Cependant, ce plan d'évaluation « experte » nécessiterait, lui aussi, d'être évalué de façon empirique pour valider son efficacité comme dans les travaux de Scapin et Bastien (Scapin & Bastien, 1997).

Comme indiqué précédemment, cette étude se base essentiellement sur la revue de la littérature pour extraire les avantages et inconvénients intrinsèques aux catégories de restituteurs. Mais, des écarts majeurs de performance peuvent apparaître selon les modèles de restituteurs testés empiriquement. Cela implique que pour le même produit, des avantages ou inconvénients identifiés dans cette étude puissent être divergeants des résultats d'évaluations empiriques. Même si la méthode proposée ici apporte des éléments importants, une étude comparative avec utilisateurs reste indispensable pour déterminer le meilleur choix dans un contexte donné.

Cette limitation étant admise, il apparaît comme important d'effectuer des évaluations empiriques dès les premières étapes du cycle de conception d'un système de RA. Autrement dit, des expérimentations peuvent être menées avant même d'avoir un prototype logiciel afin de choisir de façon pertinente le restituteur.

La section suivante présente justement les études exploratoires amont qui ont été menées lors de la conception du système SCIV. Ces études ont été réalisées dans un contexte de projet industriel de courte durée. Cela implique que les objectifs et la portée de ces études ont été définis essentiellement par les contraintes industrielles. Par conséquent, les méthodes appliquées ont été adaptées aux besoins du projet tout en permettant d'apporter des recommandations ergonomiques pour la conception.

## 6. APPLICATION DE LA TAXONOMIE À L'ÉVALUATION EXPLORATOIRE

---

Les études exploratoires présentées ici ont été effectuées sur un démonstrateur de réalité augmentée pour le fantassin qui a été développé dans le cadre d'un projet industriel (Sagem et DGA). L'objectif de ces différentes évaluations était de fournir des recommandations ergonomiques tout au long de la conception du système afin d'orienter différents choix de conception. Les problématiques, moyens et méthodes étaient donc fortement contraints par le périmètre technique, temporel, budgétaire et contractuel de ce projet. Par conséquent, la portée d'analyse de ces expérimentations était pragmatique avant d'être fondamentale.

Cependant, la réflexion et les résultats obtenus durant ces expérimentations nous ont permis d'identifier certains aspects plus fondamentaux potentiellement généralisables à d'autres contextes d'utilisation de la RA. L'objectif de cette section est justement de présenter ces différentes études avec leurs objectifs et méthodes, mais aussi les aspects plus fondamentaux qui ont été pressentis et qui pourraient faire l'œuvre d'expérimentations spécifiques.

Nous avons évalué l'utilisabilité à différents stades d'avancement du projet et, donc, différents niveaux de maturité du prototype. Par conséquent, dans le même chapitre, les IHM étudiées peuvent être très différentes d'une étude à l'autre.

Les thématiques abordées s'intéressent à trois niveaux différents de l'interaction Homme-machine. Même si il est très délicat de séparer les aspects physiques, perceptifs ou cognitifs, nous avons regroupé les études selon le niveau d'abstraction de l'interaction.

La première thématique concerne le dispositif matériel et son impact sur l'utilisateur.

La seconde traite des aspects de perception et de lisibilité de l'information. La dernière s'intéresse à l'analyse et l'interprétation des éléments augmentés, ce qui correspond dans le cas du système étudié, à la compréhension de la situation tactique ou *Situation Awareness* (SA).

## 6.1 ÉVALUATION DE RESTITUTEURS

Comme indiqué précédemment, le dispositif de restitution est un aspect essentiel dans l'usage d'un système de RA. Avant même de s'intéresser aux problématiques d'IHM et de représentations graphiques, le choix du restituteur est critique à la fois par son impact et sa dépendance au contexte d'utilisation. En effet, comme nous le montrerons ici, de nombreux aspects permettent d'évaluer l'adéquation entre un restituteur et son contexte d'emploi indépendamment de tout contenu informationnel. Ce chapitre présente deux études qui ont été menées afin de comparer différents restituteurs possibles et donc de déterminer le choix le plus pertinent selon l'application visée par le projet.

### 6.1.1 Étude comparative de restituteurs

#### 6.1.1.1 Objectifs

Cette étude, effectuée tôt dans le processus de conception du système de RA, avait pour objectif d'identifier les avantages et inconvénients ergonomiques et donc de déterminer le meilleur choix entre deux HMD présélectionnés dans le cadre de ce projet. Ces deux restituteurs *optical see-through* (OST) se différencient par leur type de restitution, l'un est monoculaire (Lumus PD-18) alors que l'autre est binoculaire (Lumus PD-20).



Figure 32 : Illustration des restituteurs Lumus étudiés; PD-18 (à g.) et PD-20 (à d.).

Les essais effectués ici devaient permettre de déterminer l'impact du port de chaque version de restituteur sur les capacités sensori-motrices de l'utilisateur et, plus précisément, dans des tâches récurrentes de l'activité d'un fantassin.

### 6.1.1.2 Méthode

#### 6.1.1.2.1 Tâche expérimentale

La tâche expérimentale consistait en un parcours d'obstacles constitué de plusieurs « ateliers » statiques ou dynamiques permettant d'évaluer les performances sur des tâches nécessitant la mise en œuvre de capacités spécifiques à l'activité d'un soldat. Cela permettait ainsi : 1) de se rapprocher d'une dynamique opérationnelle, avec une succession logique de tâches à réaliser (s'orienter, progresser, manipuler des objets/équipements, etc.), 2) d'inclure des phases dynamiques (franchissement d'obstacle, course, etc.) et statiques (manipulation d'équipement, observation de l'environnement, etc.). Dans l'ordre chronologique, les participants devaient réaliser les tâches suivantes :

- Slalom entre obstacles au pas de course.
- Franchissement d'obstacles (Barrières).
- Observation de l'environnement (test de lecture de 10 à 60m).
- Test d'équilibre (franchissement de poutre).
- Lancer de grenade dans une cible (de 10 à 20m).
- Passage escalier colimaçon (forte luminosité).
- Montée d'une échelle.
- Passage escalier droit (faible luminosité).
- Saisie d'objets immobiles en marchant.
- Saisie d'objets dynamiques à l'arrêt.

Ce parcours était effectué par chaque sujet avec chaque restituteur ainsi qu'une condition contrôle (sans HMD). L'ordre de passation a été contrebalancé afin d'éviter les potentiels effets d'ordres sur le port des HMD.

Sujets	Ordre de passation		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
1	Situation contrôle	HMD 1	HMD 2
2	Situation contrôle	HMD 2	HMD 1
3	Situation contrôle	HMD 1	HMD 2
4	Situation contrôle	HMD 2	HMD 1

Tableau 20: Déroulement du protocole.

#### 6.1.1.2.2 Participants

Quatre participants ont effectué cette expérimentation, tous de sexe masculin avec un âge moyen de 33 ans (+/- 8.5). L'un d'eux est d'ailleurs un ancien militaire exerçant la fonction de conseiller opérationnel au sein de Sagem. Les trois autres ont une pratique régulière à intensive du sport. Ils avaient tous une vue normale ne nécessitant pas de correction. Aucun d'eux n'étaient familier de l'usage de ce type de restituteur ni des systèmes de RA.

### 6.1.1.2.3 Données recueillies

Afin de comparer l'impact des deux restituteurs sur les capacités des utilisateurs, nous avons défini une liste de critères à mesurer durant ces essais.

Ergonomie physique / physiologique	Critères	Moyens d'évaluation
	Conservation des capacités de progression	Simulation partielle d'un mode de déplacement tactique et franchissement de passage d'obstacles (escalier droit, colimaçon, barrière poutre)
	Conservation des capacités d'orientation et d'observation	Evaluer une distance, conserver un point de repère, réaliser un balayage visuel, prendre une visée, saisir un objet en marchant, lire une plaque d'immatriculation
	Conservation de la dextérité manuelle	Lancer une grenade dans une zone prédéfinie, rattraper un chargeur lancé, changer la batterie d'un équipement (FIR, JIM), faire un lacet
	Tolérance de port	Recueil du ressenti utilisateur au cours et à l'issue des essais (balourd, point de compression, apparition de maux de tête, fatigue visuelle, etc.)
	Compatibilité du port du restituteur avec les tâches opérationnelles	Observation du comportement du restituteur aux cours des différentes phases d'action (stabilité, notamment)
	Adaptation aux caractéristiques anthropométriques	Adaptation du restituteur sur des individus présentant diverses morphologies de tête (besoin d'acquérir du matériel de mesure anthropométrique)

Tableau 21: Les critères d'évaluation.

Ces critères ont conduit à l'utilisation de questionnaires et entretiens semi-dirigés post-tes, et à l'analyse des enregistrements vidéos des tests. Au cours et à l'issue des essais, les participants sont invités à donner une appréciation sur chacun des critères évalués, appréciation exprimée en termes d'impact sur leurs performances. Par exemple, la conservation de leurs capacités de progression et d'orientation s'évalue selon le degré d'impact des restituteurs sur leur champ visuel, la possibilité d'anticiper des obstacles, la non déformation (visuelle) de l'environnement, la facilité à évaluer les distances, etc.

### 6.1.1.3 Résultats

Compte tenu du faible nombre de participants et de l'aspect exploratoire de l'étude, les résultats présentés ici n'ont pas fait l'objet d'analyses statistiques. Il s'agit avant tout d'une évaluation informelle à travers un protocole standardisé pour tous les participants, permettant d'identifier les tendances subjectives majoritaires. Les résultats présentés ici ne sont qu'indicatifs et permettent simplement de quantifier les observations recueillies mais ne peuvent être généralisés.

#### 6.1.1.3.1 Impact sur les capacités visuo-motrices

La figure suivante récapitule les cotations moyennes attribuées à l'impact des restituteurs sur les différentes métriques. Ces résultats sont issus du dépouillement des questionnaires, sur une échelle de 0 (pas d'effet) à 4 (effet très important). Autrement dit, plus le score est élevé, plus c'est négatif. Chaque participant devait évaluer les effets des restituteurs sur le champ visuel, l'acuité, l'habileté manuelle et le franchissement d'obstacle.

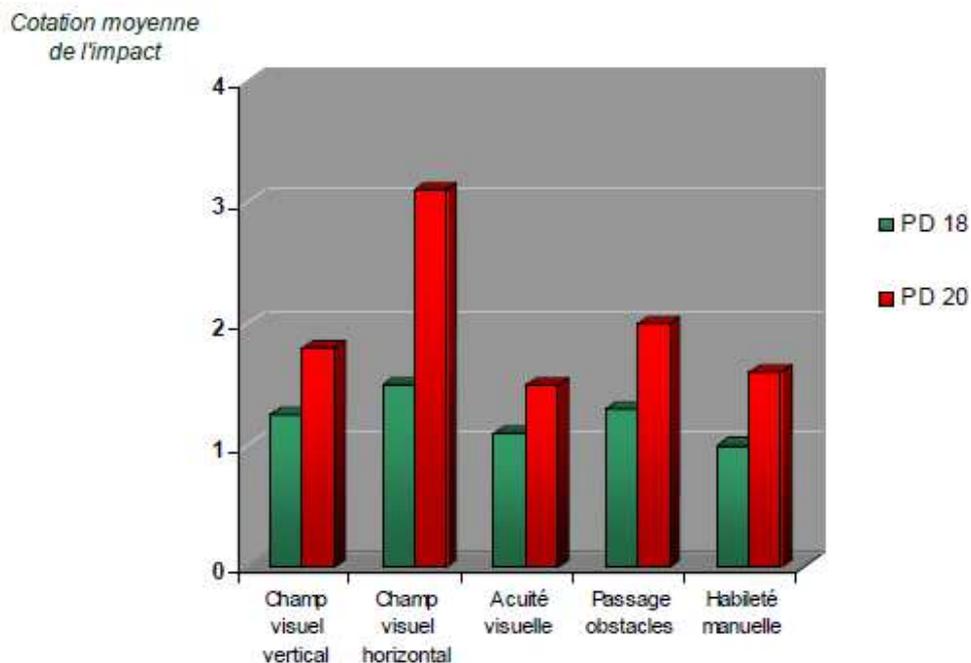


Figure 33: Impact des restituteurs sur les capacités visuo-motrices.

#### Champ visuel

On constate que les cotations attribuées sont toujours plus élevées pour le PD-20, et notamment les effets sur le champ visuel horizontal ( $M=3.1$  contre  $M=1.5$  pour le PD-18). Ce résultat s'explique par le facteur de forme du restituteur, dont le format de type lunette obstrue de façon importante le champ visuel périphérique. En effet, le volume des branches de ce HMD réduit de façon importante le champ périphérique des utilisateurs.

Les mesures effectuées avec chaque sujet indiquent un angle visuel disponible entre 57° et 59°, soit environ trois fois moins que le champ de vision naturel.

### **Franchissement d'obstacle et test d'équilibre**

En conséquence, les cotations sur le passage d'obstacles ont été plus importantes pour le PD-20. En effet, la réduction du champ visuel a amené les participants à modifier leur mode de déplacement pour palier à ces contraintes visuelles. Dans la réalisation des tâches et comparativement à la situation contrôle, les sujets ont effectué des mouvements de la tête plus nombreux et plus saccadés lors de leurs déplacements et notamment lors du franchissement d'escaliers ou d'obstacles. Ce constat est particulièrement important dans le cas du test d'équilibre (franchissement d'une poutre), où le port du PD-20 oblige les utilisateurs à orienter leur regard beaucoup plus bas, afin d'anticiper chaque pas. De plus, les participants indiquent globalement ressentir plus souvent des déséquilibres avec le PD-20, que dans les situations contrôles ou avec le PD-18. D'une manière générale donc, le PD-20 implique une plus grande focalisation attentionnelle sur les obstacles et entraîne une modification du comportement visuo-moteur et une dégradation de l'équilibre des sujets non observés dans les autres situations (contrôle et PD-18).

### **Acuité visuelle**

Le niveau de luminance des incrustations affichées dans les deux reconstituteurs est trop faible pour risquer de dégrader la bonne visibilité de l'environnement. Il n'y a donc pas eu de phénomène de masquage lié à l'affichage de l'IHM en RA lors des tests de lecture. En outre, ces tests n'ont pas permis d'établir une quelconque baisse de l'acuité visuelle des participants due au port des reconstituteurs. Les cotations obtenues ( $M = 1.10$  pour le PD-18 et  $M = 1.50$  pour le PD-20) sont dues à des gênes ressenties provoquées par des artéfacts sur la surface vitrée du reconstituteur.

### **Habilité manuelle**

La saisie, le lancer et la récupération d'objet au vol ne semblent pas avoir été impactés de façon importante par le port des reconstituteurs. Aucune différence flagrante n'a été constatée sur ces tâches en termes de performances.

On constate cependant de légères différences comportementales (posture et orientation de la tête) avec le PD-20 lors de la tâche de récupération d'objets lancés. Les sujets ont tendance à plus se focaliser sur la trajectoire de l'objet afin de mieux anticiper sa réception qu'avec les autres conditions.

#### *6.1.1.3.2 Autres résultats*

Au-delà des effets sur les capacités visuo-motrices, ces essais ont permis d'identifier d'autres aspects impactant l'ergonomie de ces deux reconstituteurs. Le protocole durant en moyenne 35 min par condition, des effets sur le confort ont pu être observés.

## Confort de port

De façon récurrente (mais variable selon les participants), les deux restitu-teurs sont à l'origine de gênes, voire de douleurs à différents points de la tête (point le plus saillant du front, point de l'occiput, racine du nez, zone sous le pavillon de l'oreille). Lors du retrait du PD18, les participants présentent des marques cutanées à l'endroit des parties rigides du restituteur (voir Figure 35.). Les testeurs ont tous eu besoin de se soulager du poids de l'équipement et de diminuer les pressions d'appui. Ils ont soulevé les restitu-teurs à plusieurs reprises au cours des essais. Pour 2 testeurs, les mouvements d'impulsion (descente de marche, amorti du pas de course par ex.) s'accompagnent d'une sensation d'appui plus forte au niveau de la racine du nez, pour les 2 restitu-teurs. Dans les deux cas, le confort de port n'est pas satisfaisant et incompatible d'une utilisation prolongée.

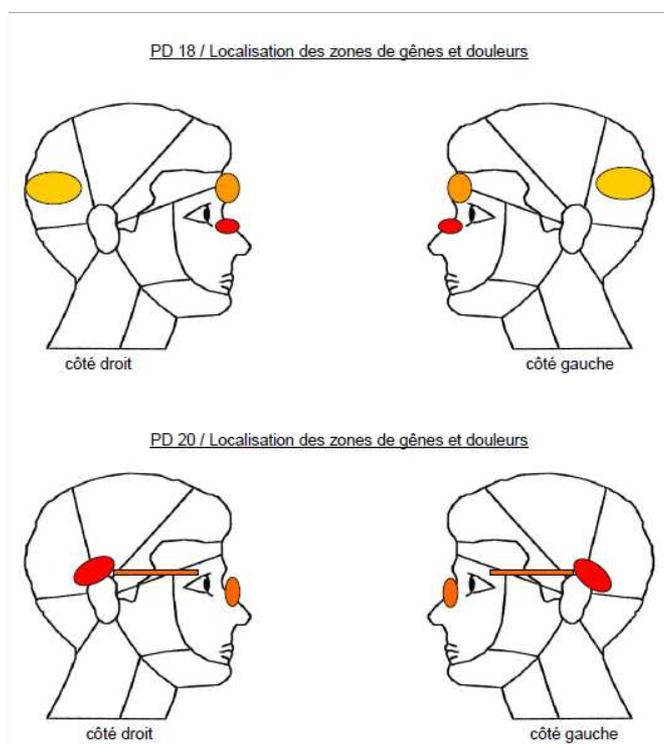


Figure 34: Localisation des zones de douleurs dues au port des HMD.

Les douleurs et gênes constatées peuvent être, en partie, expliquées par la masse et la répartition de celle-ci, ainsi que par des problèmes de stabilité et de réglage des dispositifs. Dans le cas du PD-18, les mouvements et impulsions dus aux déplacements n'ont pas provoqué d'instabilité du restituteur. Ce risque a été limité par le serrage maximal de la sangle de maintien. Cependant, ces réglages étant insuffisants compte tenu du poids de l'ensemble, le serrage excessif de la sangle provoque une perte de confort importante sur les zones frontales et nasales servant d'appui au restituteur, comme le montrent les marques cutanées visibles sur la figure suivante.



Figure 35 : Marques cutanées dues au port du PD-18 (30 min de port).

A l'inverse, le PD-20 ne possède aucun moyen de réglage du maintien sur la tête, ni du positionnement de la surface d'affichage devant les yeux. La position du restituteur est assurée par une pression excessive des branches de celui-ci, provoquant donc une douleur le long des surfaces de contact (zones temporales et auriculaires). De plus, cet inconfort n'assure pas un maintien suffisant et les participants ont signalé des sautilllements du dispositif lors de la course ou de la descente d'escalier. Enfin, le penchement en avant (franchissement de barrière) provoque une chute du restituteur. En résumé, ces deux restituteurs ne possèdent pas de réglages suffisants pour s'adapter aux différentes morphologies des utilisateurs et ainsi fournir un compromis confort/maintien satisfaisant.

### **Confort visuel**

Un autre aspect ergonomique important observé lors de l'évaluation des restituteurs de RA concerne l'impact sur le confort visuel. Par le biais des questionnaires et entretiens, nous avons identifié des effets physiologiques secondaires ainsi que des effets directs sur la perception induite par le port des deux restituteurs.

Dans le cas du PD-18, les participants ont signalé des problèmes de visibilité des informations incrustées qui ne sont pas perçues de manière homogène sur la surface d'affichage.

Ces « angles morts » varient fortement d'un utilisateur à l'autre, mais aucun n'a pu percevoir convenablement l'ensemble de l'IHM. De plus, les taux de luminance et de contraste d'affichage ne sont pas suffisants pour percevoir les éléments affichés sur un arrière plan réel, l'environnement extérieur étant plus lumineux. Pour palier à ce problème technique, le PD-18 est équipé d'un clapet teinté permettant d'augmenter notablement le contraste réel/virtuel en assombrissant la luminosité extérieure.

Le PD-18 étant monoculaire, cette astuce a l'inconvénient de fournir un taux de luminosité différent pour chaque œil provoquant ainsi un inconfort visuel signalé par plusieurs participants. Cela se traduit par une difficulté de réadaptation à une vue normale après le port prolongé du HMD.

Confort Visuel	PD 18				PD 20			
	Testeur 1	Testeur 2	Testeur 3	Testeur 4	Testeur 1	Testeur 2	Testeur 3	Testeur 4
Picotement	non							
Difficulté de réadaptation	oui	non	oui	non	non	oui	non	non
Fatigue visuelle	non	non	non	non	non	oui	non	non
Maux de tête	non							

Tableau 22 : Réponses des sujets sur le confort visuel des restituuteurs.

Comme l'indique le tableau précédent, deux sujets ont constaté ces difficultés et ont indiqué retrouver une sensation visuelle normale après 30 sec à 1 min. Cependant, ils ont indiqué que, si le port s'était prolongé, ils auraient certainement ressenti une fatigue oculaire plus importante.

Concernant le PD-20, un seul sujet a rapporté des effets secondaires suite à son utilisation alors que les autres participants l'ont considéré relativement plus confortable (visuellement) que le PD-18. Par ailleurs, les problèmes de lisibilité de l'IHM constaté sur le PD-18 sont ici encore plus marqués, avec une incapacité totale des participants à lire les informations avec un arrière plan lumineux, les obligeant ainsi à placer leur main devant le HMD pour masquer l'environnement réel. Ce confort visuel (relatif) s'explique par la nature binoculaire du restituuteur qui est similaire à la vision naturel humaine. Chaque œil est appareillé de manière identique (réduction du champ visuel et réduction de la luminosité extérieure symétrique) ce qui ne provoque pas de différences perceptives notables entre les deux yeux.

#### **6.1.1.4 Discussion**

L'ensemble des résultats de cette étude, bien qu'exploratoire, a permis de dégager un certain nombre d'éléments permettant d'orienter le choix entre ces deux restitueteurs. Tout d'abord, même si le PD-20 offre un meilleur confort visuel, ou plutôt moins d'effets secondaires, ses performances pures ne permettent pas un usage efficace en extérieur. Certes, les éléments virtuels de l'IHM ne doivent pas gêner la perception de l'environnement réel, mais ils doivent tout de même être visibles en superposition de celui-ci, ce qui n'est pas le cas avec ce HMD. De plus, son facteur de forme en lunette induit deux inconvénients majeurs pour l'usage par un fantassin. Le premier aspect qui concerne l'effet « tunnel » provoqué par la réduction drastique du champ visuel, impacte directement les capacités naturelles d'observation d'un soldat et cette suppression du champ visuel périphérique induit une dégradation des performances visuo-motrices et notamment de la gestion de l'équilibre et du franchissement d'obstacle. De plus, ce restituteur ne propose aucun réglage de positionnement et de maintien, ce qui provoque douleurs et instabilités du dispositif lors de déplacements. L'ensemble de ces constats élimine donc le PD-20 pour être intégré dans le système de RA pour le fantassin visé ici.

Par conséquent, et même si il n'est pas exempt de défauts, c'est le PD-18 qui a été retenu comme restituteur. Tout d'abord, ses performances d'affichage (avec le clapet) permettent de lire les éléments virtuels en superposition de l'environnement réel extérieur. De plus, son facteur de forme n'induit aucune dégradation du champ visuel naturel de l'utilisateur et donc n'impacte pas ses performances visuo-motrices.

Il y a cependant des réserves ou axes d'améliorations à traiter pour que ce restituteur soit satisfaisant. La conception mécanique doit être revue pour fournir, d'une part, plus de réglage afin d'offrir un compromis confort/ maintien acceptable et, d'autre part, plus de réglage de positionnement de la surface d'affichage devant l'œil de l'utilisateur afin que celui-ci puisse percevoir la totalité de l'IHM.

#### **6.1.1.5 Limites et perspectives**

Cette étude exploratoire, même si elle a permis d'orienter le choix du restituteur, comporte certaines limites méthodologiques qui restreignent la portée des résultats obtenus. Tout d'abord, le faible nombre de sujet ( $N=4$ ) ne permet pas d'assurer la représentativité de l'échantillon et encore moins une généralisation des résultats. Ensuite, même s'il s'agissait d'une comparaison entre un HMD monoculaire (PD-18) et binoculaire (PD-20) l'ensemble des résultats obtenus ne peut être généralisé à tous les restitueteurs de ce type.

En effet, les aspects qui ont orienté le choix final sont essentiellement liés aux caractéristiques intrinsèques des deux produits et notamment les faibles performances graphiques et la conception mécanique du PD-20 occultant le champ visuel périphérique.

Par ailleurs, les conséquences de cet effet tunnel sur la gestion de l'équilibre et sur les capacités visuo-motrices nécessiteraient des études spécifiques plus poussées avec, par exemple, l'emploi de double plateforme de force, afin de quantifier et mesurer cet impact sur le pattern de locomotion des fantassins.

Enfin, même si une IHM statique était affichée durant les tests pratiqués ici, cette étude ne permet pas de conclure sur le confort de perception et de visualisation des informations virtuelles. Cet aspect a fait l'objet d'études complémentaires présentées dans les chapitres suivants.

Malgré ces caractéristiques spécifiques aux modèles étudiés, certains avantages et inconvénients liés au type de restituteur ont pu être identifiés. Par exemple, le confort visuel observé avec le PD-20 est dû au fait qu'il soit un restituteur binoculaire. De même, les problèmes de contraste asymétrique pour les deux yeux et les difficultés de réadaptation à une vue normale constatées avec le PD-18 sont essentiellement provoquées par le fait qu'il soit un restituteur de type monoculaire. Ces résultats sont cohérents de ceux trouvés avec l'application de la taxonomie et du plan d'évaluation associé. D'une certaine manière, cela conforte deux aspects de notre *framework* d'analyse de la RA .

- La classification des restituteurs (le quatrième axe 4 de la taxonomie WOTSH&R) a été appliquée dans l'élaboration du protocole d'évaluation. Les deux produits ont été placés dans la bonne catégorie (« case ») de restituteur de la classification. Ainsi, l'évaluation du PD18 vs PD20 a évolué vers l'évaluation d'un HMD monoculaire Optical see-through vs un HMD binoculaire Optical see-through. Les deux étant HMD et Optical see-through, ils partageaient la plupart des avantages et inconvénients de ces catégories. Le protocole a donc été orienté vers l'évaluation des points faibles de la catégorie restante, le mode de restitution (Mono, bi, stéréo).

- Au regard de la grille de critères proposée avec la taxonomie, les aspects bas niveau du plan d'évaluation et notamment les critères liés aux aspects physiques et physiologiques, ont été sélectionnés. Ainsi, les tâches expérimentales produites ont été suffisamment pertinentes et sensibles pour obtenir des préconisations pour la conception. Cependant, les évaluations empiriques comparant deux restituteurs de la même catégorie restent nécessaires pour évaluer les critères liés aux aspects perceptifs et cognitifs du plan d'évaluation.

La section suivante présente les études empiriques exploratoires menées justement sur ces aspects cognitifs et perceptifs.

## 6.2 ÉTUDE DE LA VISIBILITE ET DE LA LISIBILITE

Les travaux présentés dans le chapitre précédent se sont intéressés à l'évaluation de restitués indépendamment du contenu informationnel du système de RA. Les résultats ont permis de choisir un produit qui sera le restitué intégré dans le démonstrateur du projet. Suite à cela, nous avons effectué des études complémentaires aux premières et qui visaient à évaluer certains aspects élémentaires de l'utilisabilité du système en considérant, cette fois-ci, l'interaction avec les informations affichées en RA. Plus précisément, nous nous intéressons ici à la facilité (ou non) de perception des éléments virtuels affichés, que se soit dans un contexte environnemental extérieur ou dans le cas d'un utilisateur déjà engagé dans une activité principale différente.

L'objectif est d'évaluer si les informations affichées en RA -indépendamment de leurs significations pour l'activité - sont exploitables dans un contexte ayant des caractéristiques principales proches de celui d'un fantassin. C'est à dire 1) un environnement visuel lumineux et variable, et 2), une activité nécessitant une focalisation attentionnelle importante sur l'observation de l'environnement. Nous avons choisi de nous intéresser particulièrement à ces deux caractéristiques car elles constituent potentiellement des contraintes fortes pour l'usage de la RA dans ce type d'application. De plus, ce sont des causes potentielles de l'apparition des troubles de basculement attentionnel et de tunnel cognitif, risques potentiels identifiés par le *framework*.

## 6.2.1 Évaluation de la visibilité

La détection et la lisibilité des informations virtuelles sont sans conteste cruciales pour une utilisation pertinente d'un système de RA. Lors d'une étude exploratoire antérieure (non présentée ici), cette problématique a été abordée dans un environnement réel extérieur et même selon différents types d'arrière plan visuels. Les résultats obtenus indiquent que le type d'environnement influence les performances des utilisateurs. Certaines caractéristiques visuelles, comme le contraste de couleur avec l'arrière plan visuel ou encore la luminosité extérieure, influencent la lisibilité des éléments affichés en RA. De plus, la couleur des objets eux mêmes, couplés aux propriétés de l'arrière plan, impacte d'autant les performances. Ces résultats rejoignent d'ailleurs ceux obtenus par Gabbard, Swan, Hix, Kim et Fitch (2007). Cependant, lors de notre précédente étude, les participants étaient uniquement concentrés sur l'affichage de mots dans le restitué et ne considéraient que peu, voire pas du tout, l'environnement réel. Par conséquent, toutes leurs ressources attentionnelles étaient mobilisées pour la détection la plus rapide possible d'un mot apparaissant sur le HMD. Cette focalisation attentionnelle pourrait expliquer les performances satisfaisantes obtenues précédemment. Afin d'étudier l'effet du focus attentionnel, nous avons intégré cet aspect dans le protocole de l'expérimentation présentée ici.

### 6.2.1.1 Objectifs

A l'instar de l'étude précédente, l'objectif ici est d'évaluer la détection et la lisibilité des éléments affichés en RA, mais cette fois-ci, nous avons utilisé directement les différents items graphiques déjà présents dans le démonstrateur. L'objectif principal étant d'évaluer l'utilisabilité et notamment la détectabilité d'événement dans cette IHM dans des situations simples ou complexes et lorsque l'utilisateur est déjà engagé dans une tâche principale dans son environnement. De plus, cette étude permet aussi de tester indépendamment chaque item et donc de déceler si certains éléments nécessitent des modifications. En outre, plusieurs types d'environnement ont été comparés comme dans l'étude précédente, afin de déterminer si l'arrière plan visuel influence le processus de détection.

### 6.2.1.2 Méthode

#### 6.2.1.2.1 Tâche expérimentale

Cette étude s'est appuyée sur un test utilisateur basé sur le paradigme de la double tâche, où les participants étaient engagés dans une tâche principale d'observation et de détection de cible dans l'environnement. La tâche secondaire consistait à détecter le plus rapidement possible l'apparition (ou la disparition) d'items sur le restitué de RA. Il est à noter que, pour des raisons techniques, le système de RA n'a pu être utilisé en condition de mobilité à l'extérieur au moment de l'étude.

Nous avons donc dû effectuer cette expérimentation en laboratoire et, donc, l'environnement extérieur était simulé par un logiciel de réalité virtuelle (VBS2) et affiché sur un grand écran devant les sujets. Ces derniers étaient assis sur une chaise à environ 3 mètres de cet écran et ils étaient équipés du restituéur PD-18. Leur tâche principale consistait à observer la scène virtuelle qui correspondait au point de vue à la première personne d'un Avatar se déplaçant dans cet environnement et à détecter la présence de cible (bidon d'essence) dans le paysage. Pendant le parcours, des items de l'IHM apparaissaient sur le restituéur et les participants devaient indiquer le plus vite possible l'apparition (ou la disparition) suivi du nom de l'item. Deux examinateurs étaient présents durant cette expérimentation, car pendant que l'un gérait le déplacement de l'avatar virtuel dans l'environnement simulé, le deuxième pilotait l'affichage des items de l'IHM de RA et mesurait les temps de réaction.

#### 6.2.1.2.2 *Participants*

Neuf personnes âgées de 27,3 ans en moyenne ( $ET = 6.8$ ), dont une femme, ont effectué ce test. Aucun des participants ne connaissait l'IHM du démonstrateur et n'avait l'habitude de porter un HMD.

#### 6.2.1.2.3 *Variables étudiées*

Dans cette étude, quatre facteurs (variables indépendantes) ont été modulés au cours des essais : l'environnement, les items de l'IHM, le mode d'affichage et le type d'événement sur l'IHM. Les variables dépendantes sont constituées par 1) la mesure du temps de réponse des sujets, et 2) par le nombre de non détection d'événement.

##### 6.2.1.2.3.1 L'environnement

Compte tenu de l'activité du fantassin, nous avons retenu trois environnements potentiellement représentatifs des contextes d'utilisation de la RA :

- Environnement désertique (D),
- la forêt (F),
- l'environnement urbain ou citadin (C).

Pour chacun de ces environnements, deux parcours ont été définis (D1, D2, F1, F2, C1, C2). Il y a donc un total de 6 parcours prédéfinis. Les environnements et les parcours ont été créés à l'aide de l'outil de simulation VBS2. Pilotés depuis un PC ils ont été projetés sur un écran de télévision grand format.

Au sein de ces parcours sont disséminés des bidons d'essences (entre 9 et 12 selon les parcours) constituant les cibles que les participants doivent repérer dans leur environnement. L'avatar qui est contrôlé par un des expérimentateurs se déplace à une vitesse de marche à pied normale. Le point de vue correspond à celui de la hauteur d'un homme adulte.

#### 6.2.1.2.3.2 Les items de RA

Durant cette expérimentation, les neuf éléments suivants de l'IHM ont été affichés dans le restitué :

- BFT (Blue Force Tracking),
- RFT (Red Force Tracking),
- cible à observer
- cible à détruire
- Waypoints
- POI (Point of Interest)
- bandeau d'alerte de proximité
- secteur d'observation
- flèche latérale (signal d'un RFT hors champ)

#### 6.2.1.2.3.3 Le mode d'affichage

Les éléments d'IHM sont présentés selon deux modalités :

- présentation unitaire (U) : un élément apparaît seul à l'écran puis disparaît avant qu'un autre apparaisse et ainsi de suite pour l'ensemble des éléments à afficher.

- présentation multiple (M) : plusieurs éléments coexistent simultanément à l'écran ; l'ordre de leur apparition est différent de celui de leur disparition.

Pour chacune de ces modalités, 3 séquences d'apparition/disparition ont été prédéfinies et numérotées de 1 à 3, soit U1 à U3 et M1 à M3. Pour chaque sujet, il y a donc un total de 6 séquences prédéfinies. Chaque séquence dure 1 minute et 30 secondes ; la durée d'apparition de chaque item est variable : elle est comprise entre 3 et 8 secondes. Ces durées ne sont pas aléatoires, elles sont prédéterminées pour chaque séquence.

#### 6.2.1.2.3.4 Le type d'événement

Ce facteur désigne la distinction entre l'apparition (On) et la disparition (Off) d'un élément sur l'IHM. Ces deux types d'événement pourront être distingués et traités séparément durant l'étude, permettant ainsi de détecter des différences, le cas échéant.

#### 6.2.1.2.4 *Déroulement*

Chaque sujet effectue les six parcours (F1, F2, D1, D2, C1, C2), avec à chaque fois un ordre d'affichage différent (U1, U2,...M3). Ainsi, la combinaison parcours/ordre d'affichage est différente pour chacun des six essais des sujets et, donc, ils n'effectuent jamais deux fois le même parcours ni deux fois le même ordre d'affichage des éléments en RA. De plus, l'ordre de passation des différents environnements a aussi été contrebalancé entre les sujets.

### 6.2.1.3 Résultats

Les résultats discutés dans cette section ne présentent seulement que les moyennes des scores obtenus selon les deux indicateurs mesurés.

#### 6.2.1.3.1 Facteur 1 : l'environnement

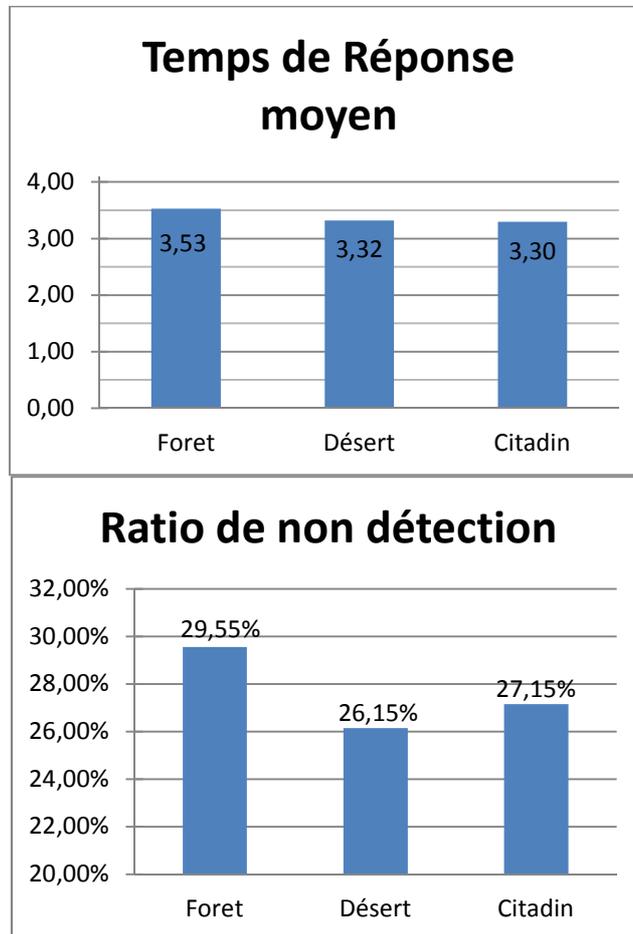


Figure 36: Résultats moyens pour les différents environnements.

Les résultats présentés ici décrivent les scores moyens globaux obtenus pour les trois environnements, toutes autres variables confondues. Que se soit pour les temps de réponse (TR) ou pour les ratios de non-détection (ND), les différences sont faibles, même si on constate des performances légèrement inférieures dans les conditions impliquant l'environnement forêt.

Plus globalement, on constate un taux de non-détection assez important dans toutes les conditions, avec une moyenne globale de 27.6%. Autrement dit, un quart des événements sur l'IHM ne sont pas détectés par les participants.

### 6.2.1.3.2 Facteur 2 : Le mode d'affichage

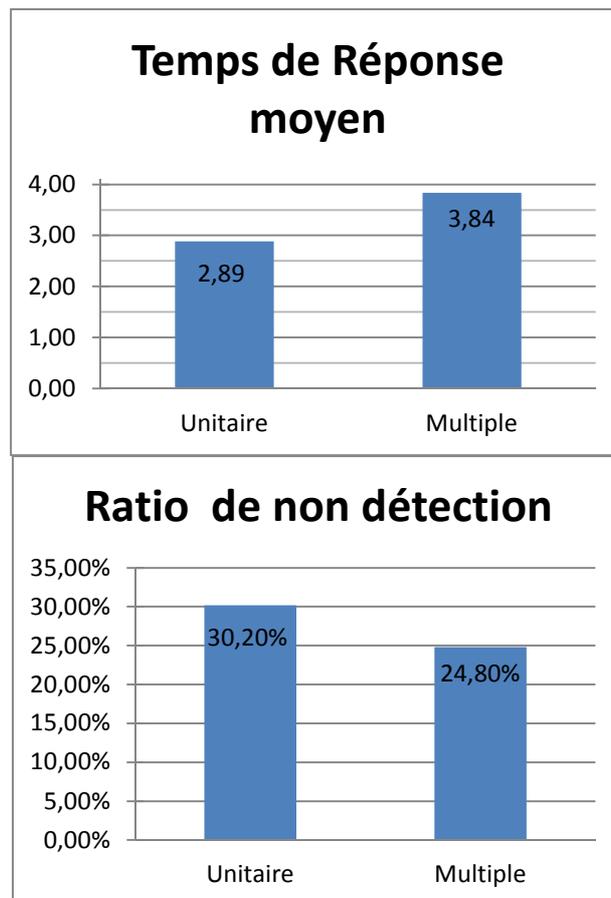


Figure 37: Résultats moyens selon le mode d'affichage.

En ce qui concerne le mode d'affichage, nous constatons des différences importantes entre les deux conditions. Le temps de réponse moyen en condition « multiple » augmente de près de 1 sec, ce qui représente plus de 30% de différence par rapport à la condition unitaire. Inversement, lorsque l'on considère les non détections, le ratio moyen est plus faible en condition multiple.

Le couplage de ces deux résultats indique que le mode d'affichage a une influence sur les performances des utilisateurs et notamment, qu'en condition multiple, les participants détectent plus d'événements sur l'IHM mais mettent en moyenne plus de temps pour les effectuer. Cela semble montrer un effet d'interaction entre les différents événements de l'IHM où, finalement, la détection d'un événement peut amener la détection d'un autre. Ce phénomène de co-détection est d'ailleurs retrouvé dans les verbalisations des participants lors des entretiens semi-dirigés post-tests.

### 6.2.1.3.3 Facteur 3 : Le type d'événement

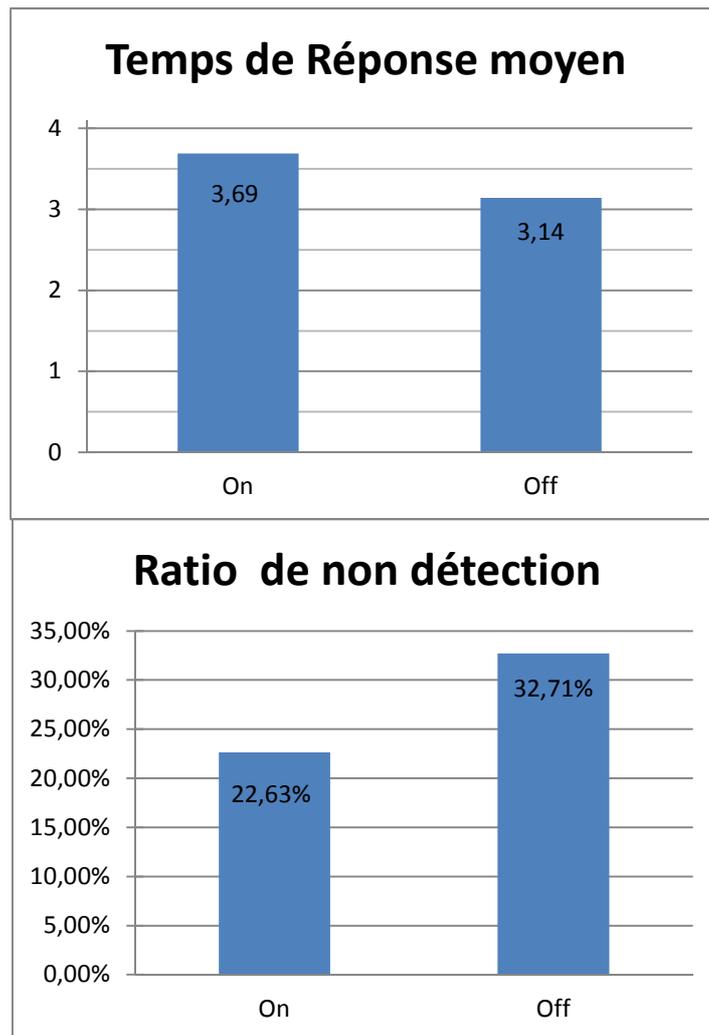


Figure 38: Résultats moyens selon le type d'évènement.

Concernant le type d'événement, les résultats moyens sur les temps de réponse sont assez proches pour les deux modalités. On constate tout de même un écart d'environ 15% du temps de détection entre l'apparition et la disparition d'élément sur l'IHM.

Cependant, les différences sont plus marquées lorsque l'on considère le ratio de non-détection, avec 50% de non-détection en plus lors de la disparition d'événement. Ces résultats semblent indiquer que les participants ont globalement plus de difficultés à percevoir ce type d'événement et indépendamment de la nature graphique de l'item, comme le montre la figure suivante.

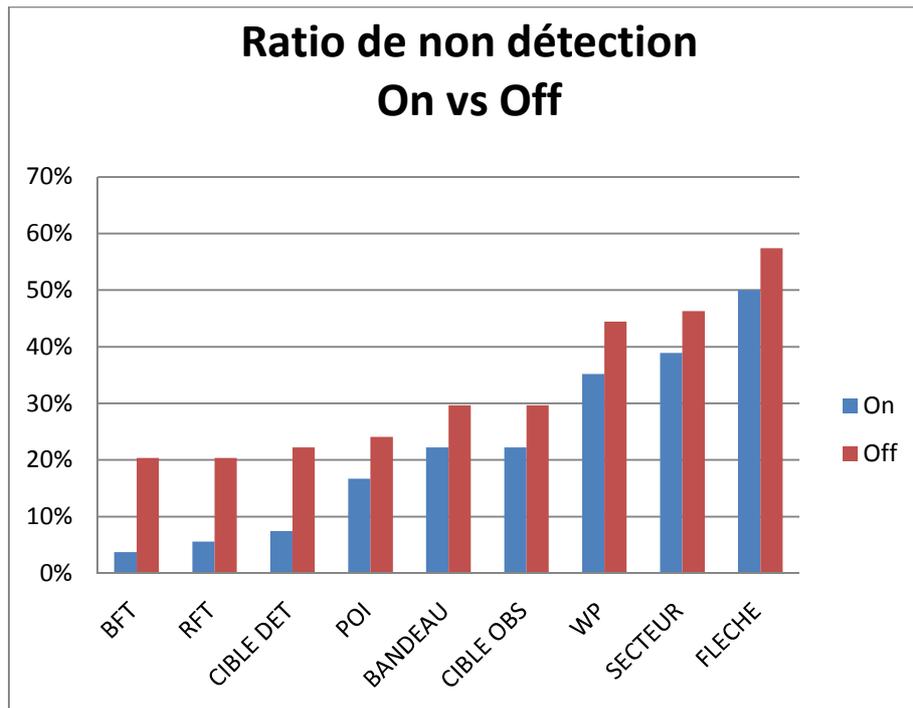


Figure 39: Ratio de ND selon le type d'item et le type d'événement.

Quel que soit le type d'item concerné, le taux de non-détection est systématiquement supérieur lors de la disparition de ce dernier. Cette différence est particulièrement marquée pour les items (BFT, RFT et Cible DET) obtenant les meilleurs scores de détection lors de l'apparition (i.e., inférieur à 10%). Cependant, les taux de non-détection de la disparition de ces items restent inférieurs aux autres types d'élément. Ce résultat indique donc que la nature de l'item employé impacte globalement les performances des utilisateurs.

#### 6.2.1.3.4 Facteur 4 : Le type d'item

Comme indiqué précédemment, le type d'item influence fortement les performances des utilisateurs. Les résultats ci-dessous présentent les scores obtenus par chaque type d'item de l'IHM.

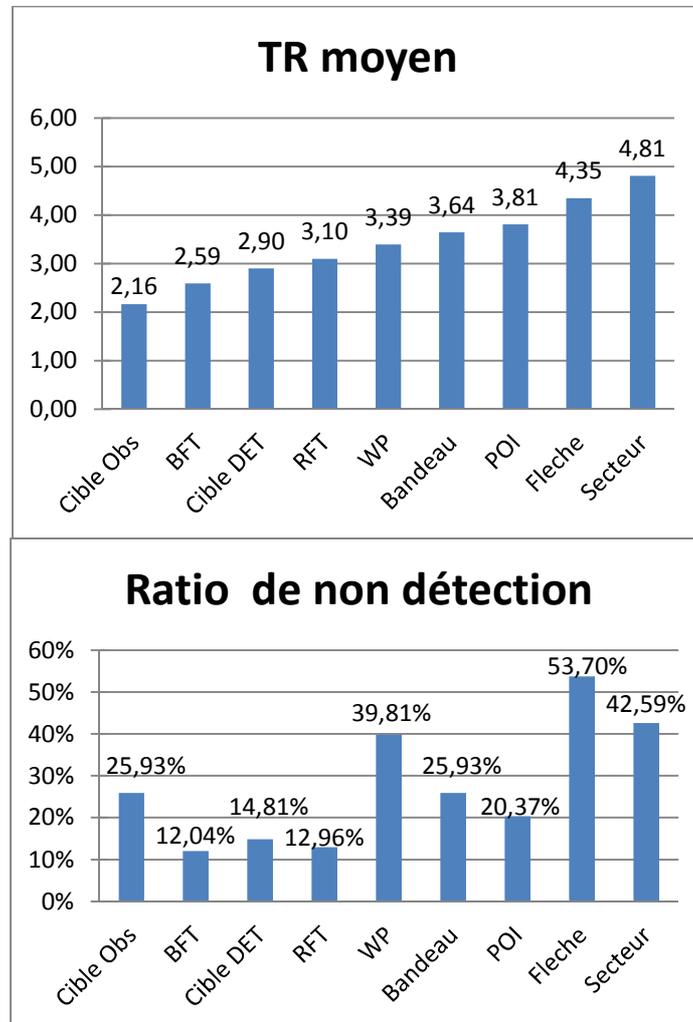


Figure 40: Résultats moyens selon le type d'élément graphique employé.

Tout d'abord, nous pouvons constater que les performances en termes de temps de réponse vont du simple au double selon l'item concerné (Cible Obs,  $M=2,16$  et Secteur,  $M=4,81$ ). De plus, les quatre items obtenant les meilleurs scores (Cible Obs, BFT, Cible DET et RFT) ont des caractéristiques graphiques relativement similaires, que se soit en termes de forme, de taille ou de positionnement sur le restituteur. A l'inverse, les items obtenant les moins bons scores (Secteur, Flèche, POI et bandeau) sont assez différents dans leur conception graphique, mais ont, en commun, le positionnement sur la surface d'affichage.

En effet, ces quatre éléments sont constamment positionnés sur les bords de l'écran, sauf les POI qui ne le sont que ponctuellement durant l'expérimentation.

Par ailleurs, si l'on considère les ratios de non-détection, même si on observe quelques régularités dans les extrémités du classement, les résultats révèlent des différences notables de ceux constatés précédemment. Ce décalage entre les deux indicateurs concerne particulièrement les items « cible Obs » et « POI ». Le premier obtenait le meilleur score en termes de temps de réponse et tombe ici en 5<sup>ème</sup> position du classement sans raison clairement identifiée. A l'inverse, le POI faisait partie des items lents à détecter, mais possède un taux de non-détection le plaçant dans le groupe de tête. Il semblerait que le phénomène de co-détection soit particulièrement appliqué à ce type d'item.

#### 6.2.1.3.5 *Autres résultats*

Au cours de cette étude, d'autres résultats ont été obtenus par le biais des verbalisations des participants entre les essais et durant les entretiens post-tests. Ces données qualitatives fournissent des éléments sur les sensations, difficultés et stratégies mises en œuvre par les sujets. Cette section présente la synthèse de ces observations, qui sont regroupées selon différentes catégories.

##### Aspects graphiques :

Au niveau de la conception graphique même des items, les participants ont consciemment détecté des effets sur la tâche. En effet, il semblerait que la couleur bleue (BFT) soit plus facilement détectée que la couleur rouge. A l'inverse, la couleur blanche (POI et WP) semble plus difficilement perceptible dans ce contexte. Ces constatations sont cohérentes des résultats obtenus sur ces deux points, avec le meilleur score obtenu pour le BFT (seulement 12,04% de ND contre 39,81% pour les WP et 20,37% pour les POI).

Par ailleurs, les participants indiquent détecter d'abord la forme puis, dans un second temps, la couleur des items. Cette observation semble cohérente des propriétés physiologiques de l'œil, dans le sens où le nombre et la répartition des photorécepteurs sur la rétine favorisent la détection des formes et mouvements sur la majorité de la surface (env. 120 M de bâtonnets) alors que la détection des couleurs est essentiellement effectuée par une zone centrale réduite (la fovéa) où se situe la plus forte concentration de photorécepteurs sensibles à la couleur (env. 5 M de cônes).

##### Aspects physiologiques :

Même si les différentes phases de l'expérimentation ne duraient que 1min 30 en moyenne, les participants se sont plaint de fatigue oculaire et même de début de maux de tête. Par ailleurs, un participant a exprimé une fatigue plus importante de l'œil gauche (celui non équipé du restituteur), en expliquant qu'il avait la sensation que « les deux yeux essayaient de voir l'IHM ». Ces effets secondaires sont provoqués par la nécessité d'accommodations successives entre les deux sources d'informations visuelles (l'écran et le HMD).

Ce mécanisme de contraction du cristallin permet de former une image nette sur la rétine et, ce, en fonction de la distance de l'objet perçu. De plus, le mécanisme de convergence visant à coordonner l'axe de visée des deux yeux sur le même point est aussi mis en jeu. Mais comme aucun élément net n'est perceptible pour l'œil non équipé, cela induit une frustration oculaire de ce dernier et pourrait ainsi provoquer les douleurs ressenties.

Plus globalement, les participants indiquent une incapacité à percevoir correctement les deux écrans simultanément et, ce, même en y accordant un effort important. Ce problème pourrait être potentiellement dû au fait que les deux sources d'informations sont situées sur deux plans focaux différents. Pourtant, les informations affichées par le PD-18 sont théoriquement collimatées à 3m, distance à laquelle se situe le téléviseur, donc toutes les informations (environnement et IHM) seraient affichées à la même distance.

Enfin, les participants ont signalé un dernier problème concernant la sensation de « disparition » de l'IHM. Ce phénomène semble pouvoir être partiel (un seul item ou une partie de l'affichage) ou total (toute l'IHM). Ce problème ne semble pas concerner un item en particulier, mais apparaît de façon plus aléatoire. Dans le cas d'une disparition partielle de l'image, il s'agit d'une conséquence de l'« *eye motion box* » (ou EMB) réduite du PD-18. Cette caractéristique optique désigne un espace dans lequel doit se situer l'œil de l'utilisateur pour pouvoir percevoir l'image projetée. Si les mouvements de l'œil et/ou un mauvais positionnement du système provoque une sortie de cet espace, il se produit alors un effet de « vignetage » de l'image, qui consiste en une réduction de la taille de la surface visible perçue et particulièrement les bords de l'affichage. Il suffit alors que l'item affiché dans l'IHM soit situé à ce moment là dans une partie vignetée, il ne sera donc plus visible par l'utilisateur jusqu'à que son œil revienne dans l'EMB.

Le vignetage ne concerne qu'une partie de la surface d'affichage et donc il restera toujours une zone de l'IHM perceptible. Par conséquent, ce phénomène optique ne peut justifier seul, le problème de disparition totale de l'IHM. Dans ce type de cas, il est possible que les phénomènes de rivalité binoculaire et de suppression monoculaire soient mis en cause. En effet, le restituteur employé étant monoculaire, les informations visuelles fournies aux deux yeux sont différentes. Dans le cas de l'œil équipé, l'environnement d'arrière plan et l'IHM sont projetés sur la rétine, alors que l'autre œil ne perçoit que l'environnement. Ces différences d'images sur les rétines provoquent une incohérence dans la fusion de ces deux sources d'informations. Dans ce type de situation, le système visuel a tendance à privilégier qu'une seule source d'information (suppression monoculaire) ou à réaliser une sorte d'alternance de priorité (rivalité binoculaire) où l'image de chaque œil sera perçue alternativement. Il est donc probable que, dans le cadre de cette expérimentation, certains participants aient subi ce phénomène et n'ont pu percevoir, par moment, que l'environnement d'arrière plan, qui, lui, est commun aux deux yeux et « ignorer » totalement l'IHM de RA affichée sur le restituteur.

### Aspects cognitifs :

Les constatations précédentes indiquent bien qu'au-delà des aspects graphiques ou physiologiques, des mécanismes cognitifs de plus haut niveau sont en jeu dans ce type de tâche et notamment les processus attentionnels. Un phénomène rapporté régulièrement par les participants concerne la détection simultanée de plusieurs items. En effet, il semblerait que l'apparition de certains éléments facilement détectables sur l'IHM permettrait aux sujets d'identifier la présence (ou l'absence) d'autres items. Ce phénomène de co-détection est d'ailleurs retrouvé dans les résultats quantitatifs décrits précédemment. En résumé, il semblerait donc que certains éléments graphiques de l'IHM se comporteraient comme des «attracteurs» initiant le basculement attentionnel et permettant ainsi aux utilisateurs de prendre conscience des informations affichées sur le restituteur.

Autre constat notable, certains participants ont signalé avoir détecté des événements sur l'IHM sans pouvoir dire explicitement ce qu'il s'est passé (« il s'est passé quelque chose, mais quoi ? »). Comme indiqué précédemment, Les caractéristiques physiologiques ne sont pas homogènes sur la surface de l'œil et cela induit des différences fonctionnelles du champ visuel sur les capacités perceptives (détection de forme, mouvement, couleurs, etc.) mais aussi sur les processus attentionnels. De manière générale et comme l'indiquent Claverie et leger (2009), les performances utiles à la vision active sont meilleures au centre et diminuent par paliers vers la périphérie (vision précise pour la fovéa, veille attentive, impression induite, puis alerte périphérique). Par conséquent, si un événement de l'IHM se produit dans le champ périphérique (>80°), il est possible que l'observateur n'en ait qu'une impression induite et non une identification claire et consciente.

Par ailleurs, si l'on considère les modèles classiques de l'attention (Broadbent, 1958; Kahneman, 1973; Treisman & Gelade, 1980) ce phénomène ressenti par les sujets pourrait être expliqué par le fait que le stimulus visuel (i.e. l'évènement sur le HMD) ait été partiellement filtré ou atténué sans pouvoir atteindre un certain seuil d'activation du focus attentionnel, nécessaire pour un traitement conscient de l'information. L'ensemble de ces phénomènes psycho-physiologiques a conduit les participants à mettre en place une stratégie de basculement attentionnel volontaire, consistant à se focaliser uniquement sur l'environnement d'arrière plan pendant un laps de temps, puis de basculer sur l'IHM afin de contrôler l'état de l'affichage et d'identifier les changements éventuels et ainsi de suite. Par ailleurs, les participants signalent un effet d'apprentissage et perçoivent cette stratégie comme de plus en plus facile à effectuer au cours de la durée de l'expérimentation.

#### 6.2.1.4 Discussion

Cette étude exploratoire a permis d'évaluer les performances de cette IHM en termes de visibilité et de détectabilité d'événement. Globalement, les résultats montrent que près d'un quart (27,6%) des événements ne sont pas détectés, ce qui, en soit, n'est pas satisfaisant pour ce type d'application, même si certains items s'en sortent mieux que d'autres. Ce premier constat nous montre que la conception graphique d'un élément (Taille, couleur et position) a un impact direct sur les performances de détection. Par ailleurs, ce taux de non détection assez élevé est notamment dû à la double tâche et donc au basculement attentionnel induit. En effet, il semblerait que les utilisateurs étaient dans l'incapacité de percevoir les deux sources d'information en même temps. Cette dichotomie des espaces d'affichage peut potentiellement être provoquée par le type de restituteur employé durant cette expérimentation. En effet, le PD-18 étant basée sur une technologie *optical see-through*, les images affichées par ce dernier n'étaient pas nécessairement situées sur le même plan focal que l'environnement virtuel du téléviseur. De plus, ce HMD étant monoculaire, il a potentiellement provoqué des phénomènes de rivalité binoculaire ou de suppression monoculaire conduisant à une forme de cécité cognitive de l'IHM.

La non-détection d'événement IHM peut être particulièrement critique pour le domaine militaire et avoir des conséquences importantes sur l'activité du fantassin. Cet aspect doit donc être soigneusement pris en considération et, notamment, via une conception graphique des éléments adaptée en conséquence. Par ailleurs, la multimodalité peut être un recours pertinent dans certaines situations.

Ce phénomène de tunnel cognitif peut, à l'inverse, avoir des conséquences négatives sur l'activité naturel du fantassin et notamment sur sa capacité d'observation de son environnement. En effet, ce dernier ne pouvant percevoir les deux en même temps, il devra, par moment, choisir de consulter son IHM au détriment de son contexte réel. Cet effet a notamment été constaté lors d'essais informels où le participant devait atteindre une cible virtuelle en environnement boisé. Nous avons constaté des situations où l'utilisateur focalisait uniquement sur le cap de la cible et ignorait complètement les obstacles réels (buissons, troncs, branches, etc.).

En résumé, tant qu'un système de RA ne permettra pas une fusion Réel/virtuel dans le même espace perçu par l'utilisateur, le gain potentiel de la RA visé (l'amélioration du SA sans augmentation de la charge cognitive) ne sera pas pleinement atteint.

### 6.2.1.5 *Limites et perspectives*

Malgré plusieurs résultats intéressants, la portée de cette étude exploratoire est limitée par différents aspects importants. Tout d'abord, le paradigme de double tâche appliqué ici n'est pas suffisamment écologique, l'activité principale des participants étant assez différente de celle d'un fantassin. En effet, pour diverses raisons techniques, nous n'avons pu concevoir un protocole en extérieur impliquant un environnement d'arrière plan réel et une activité dynamique de l'utilisateur. Si cela avait été le cas, il est probable que les résultats fussent dégradés, car les participants auraient dû engager plus de ressources attentionnelles à leur déplacement et, ce, en continu. Par conséquent, la stratégie de basculement volontaire n'aurait peut être pas été aussi facilement réalisable.

Autre point important, la plupart des effets constatés semblent dûs à la nature du restituteur employé. En effet, la restitution monoculaire ainsi que la technologie *optical see-through* fournissent des causes probables de certaines difficultés rencontrées par les participants. Mais d'un autre côté, il est possible que les résultats obtenus puissent aussi être expliqués par le fait que les informations de l'IHM étaient statiques et n'étaient pas corrélées à l'environnement d'arrière plan. Par conséquent, cette étude permet de constater l'effet de tunnel cognitif sans pouvoir déterminer si cela est dû au HMD ou au fait que ce système de RA soit de type H (dans la classification WOTSH&R).

Enfin dernier point critique, les résultats obtenus indiquent que la représentation graphique impacte directement les performances des utilisateurs. Mais comme nous avons utilisé les items de l'IHM du démonstrateur en l'état, nous n'avons pas pu faire varier et isoler les paramètres graphiques des éléments. Par conséquent, nous n'avons pu identifier « les réglages » nécessaires pour constituer un élément qui soit un « attracteur perceptif ».

En résumé, cette étude exploratoire a permis d'identifier un problème ergonomique majeur des systèmes de RA et de déceler certaines pistes de réponses. Des travaux complémentaires pourraient être menés pour explorer ces voies, et notamment sur les trois aspects suivants :

- Effet du restituteur : comparaison monoculaire VS binoculaire et VST VS OST.
- Effet de l'espace d'affichage : Espace H VS Espace W.
- Effet des attracteurs : Moduler les propriétés graphiques des items et leur comportement dynamique (3+1 dimension).

## 6.3 ÉVALUATION DE LA COMPREHENSION DE LA SITUATION

Les études précédentes ne s'intéressaient qu'aux aspects perceptifs liés aux informations affichées en RA mais pas de leur traitement ni de leur intégration dans l'activité des utilisateurs.

Ce chapitre présente une étude ayant pour objectif d'évaluer l'interprétation des informations de RA et plus particulièrement de leur intégration dans le contexte spatial des utilisateurs. Le but visé par le système de RA, développé dans le cadre de ce projet, consiste à fournir au fantassin des informations tactiques sur la situation au combat et notamment dans son environnement proche.

La fonction attendue de ce système est de pouvoir afficher ces informations directement dans le champ visuel de l'utilisateur et en cohérence de son point de vue. Ainsi, le soldat pourrait potentiellement avoir une meilleure conscience de la situation (*Situation awareness*) grâce à une contextualisation plus directe des informations tactiques, lui fournissant un accès rapide et précis à ces éléments.

L'objectif de l'étude présentée dans ce chapitre est d'étudier l'efficacité de l'interface du système de RA sur l'interprétation de la situation tactique et notamment sur la facilité d'interprétation des positions des cibles affichées, ce qui constitue en soit, le premier niveau de *Situation awareness* selon la définition de Endsley (1995).

### 6.3.1 Étude de la perception de la situation tactique

#### 6.3.1.1 Objectifs

Cette étude a pour objectif global d'évaluer si l'utilisation du démonstrateur de RA de ce projet permet de fournir à l'utilisateur une bonne « conscience » de la situation tactique (SITAC) autour de lui.

Pour rappel, ce système a pour but d'améliorer la *situation awareness* du soldat en lui affichant des éléments tactiques virtuels en superposition de la réalité qu'il perçoit. Ces items représentent la position des alliés (BFT) et ennemis (RFT) sur le champ de bataille autour de lui. Dans le cas présent, l'IHM du démonstrateur évalué fournit une représentation des éléments « vues à la première personne », c'est-à-dire que les positions des items de RA sur le restituteur sont corrélées à l'environnement réel d'arrière plan (espace perceptif de type O dans la taxonomie WOTSH&R). En effet, la position (GPS) et l'orientation (centrale inertielle) de l'utilisateur sont pris en compte pour déterminer le comportement graphique des éléments tactiques, que se soit en gisement ou en distance. Ainsi, le système fournit une représentation de la SITAC cohérente du point de vue de l'utilisateur et permet donc une contextualisation directe des informations dans l'environnement réel de l'utilisateur. Cette interprétation des éléments tactiques ainsi que leur projection dans l'espace réel est donc supportée par le système et non plus par l'utilisateur.

Par conséquent, un des gains attendus de ce type d'IHM est d'alléger la charge cognitive des fantassins liée au traitement des informations tactiques et de simplifier l'accès à ces dernières.

Le but principal de cette étude est justement de vérifier si les informations de RA sont facilement interprétables par les participants et s'ils parviennent à contextualiser et spatialiser dans leur environnement réel les positions des éléments tactiques affichés.

### **6.3.1.2 Méthode**

#### **6.3.1.2.1 Matériel**

Cette étude s'inscrivant dans le cadre d'un projet industriel, elle avait pour objectif d'évaluer le démonstrateur actuel. Nous nous sommes donc appuyé sur le dispositif matériel et logiciel constitutif de ce prototype.

Ce système intègre un restituteur monoculaire LUMUS PD-18 de type *optical see-through* identique aux études précédentes, qui était relié à un PC portable posé sur une table à côté du participant, comme le montre la figure suivante.



Figure 41: Illustration du dispositif expérimental avec le PD-18 porté par un utilisateur lors de l'expérimentation.

Ce système permet d'afficher directement dans le champ visuel de l'utilisateur les items de RA représentant des cibles à différentes positions (distance et direction). L'IHM étudiée ici, s'appuie sur une discrétisation en quatre classes de distance. En effet, selon la position réelle de la cible, sa représentation varie de façon non pas continue mais selon la plage de distance dans laquelle elle se trouve.

- Cible à moins de 50 mètres : Représentation « bandeau »
- Cible entre 50 et 100 mètres : Représentation « RFT1 » (grande taille)
- Cible entre 100 et 150 mètres : Représentation « RFT2 » (taille intermédiaire)
- Cible au-delà de 150 mètres : Représentation « RFT3 » (petite taille)

Il est à noter que les plages de distance ont été réduites à ces valeurs pour être cohérentes avec l'environnement réel où s'est déroulée l'expérimentation. En fonctionnement normal, les distances indiquées ici sont doublées.

Ces différents items se différencient principalement par la taille du cercle représentant l'incertitude de position ainsi que la classe de distance. La représentation bandeau est radicalement différente et ne permet pas de donner l'orientation de la cible mais seulement sa présence dans un périmètre proche. Lorsqu'une cible est en dehors du champ de vision de l'utilisateur, une flèche apparaît sur le côté concerné afin d'indiquer la présence et la direction de la menace non visible.

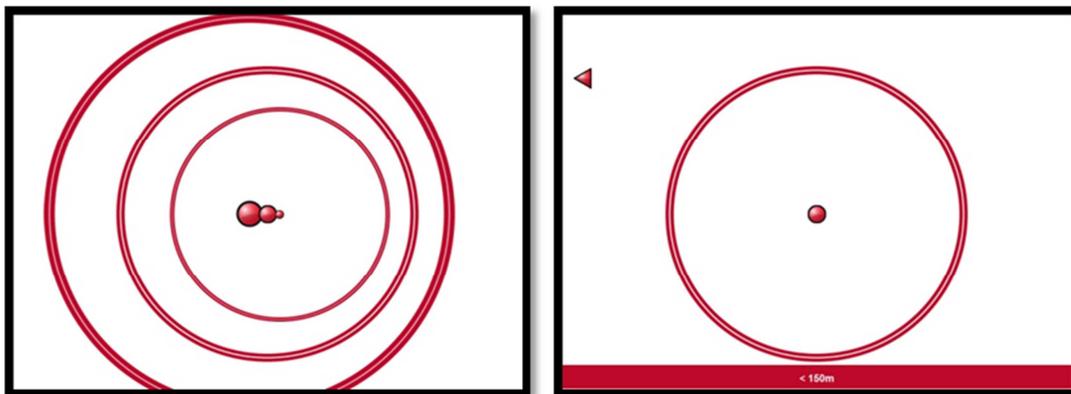


Figure 42 : Illustration des trois types de RFT (en g.), le bandeau et la flèche latérale (en d).

#### 6.3.1.2.2 Participants

Neuf personnes, dont une femme, ont effectué ce test (Moyenne d'âge de 27.3 ans,  $ET=6.8$ ). Aucun des participants ne connaissait l'IHM du démonstrateur et n'avait l'habitude de porter un HMD avant leur participation à ces essais\*.

*\* Nota : Il s'agit du même panel de sujets que dans l'expérimentation sur l'étude de la visibilité décrite dans le chapitre précédent, car ces deux expérimentations ont été menées durant la même campagne d'essais. Les sujets effectuaient d'abord la première étude, puis participaient à ce protocole dans un second temps.*

### 6.3.1.2.3 Tâche expérimentale

L'expérimentation, organisée à l'extérieur, consistait à demander aux participants de replacer sur une carte papier les cibles affichées en RA. Cette carte correspondait à l'environnement réel où se sont déroulés les essais. Les sujets étaient répartis en deux groupes, l'un ayant une carte avec les cercles représentant les plages de distances, l'autre ayant une cartographie sans cercles.

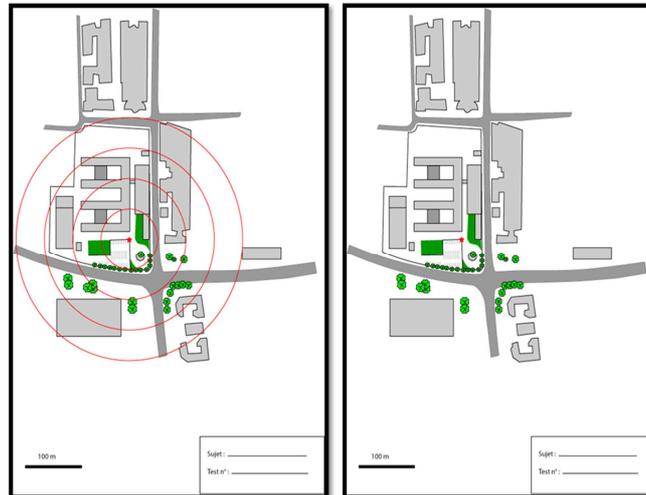


Figure 43 : Les deux types de cartographies papier: avec plages de distance (à g.) et sans (à d.).

Les points virtuels sont positionnés dans l'espace de façon à constituer des affichages ambigus dans le restitué (superpositions, imbrications, effets géométriques, etc.). Pour ce test, trois types de cas ont été établis. Ils se distinguent par le nombre d'éléments affichés simultanément : 3, 5 ou 7.

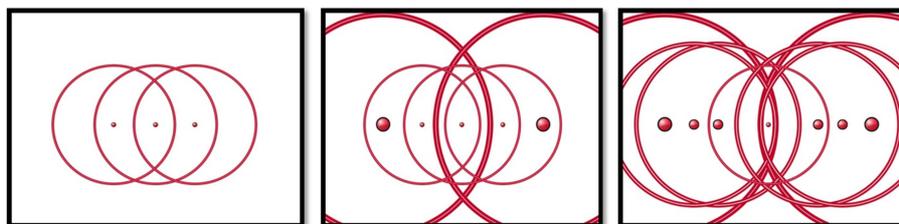


Figure 44 : Exemples de scènes à trois, cinq et sept items.

Le nombre d'éléments affichés et leurs positions ne varient pas au cours d'un cas. Les points correspondent à des coordonnées GPS fixes. Les éléments sont donc les mêmes du début à la fin, ils ne se déplacent pas et ne disparaissent pas non plus.

#### 6.3.1.2.4 Variables et données recueillies

Durant ce protocole, trois variables indépendantes intra-individuelles ont été manipulées ; 1) la complexité de la scène\* (3, 5 ou 7 items), 2) la nature de la cible\* (BFT ou RFT) et 3) la distance des cibles (proche, intermédiaire et distante). A cela s'ajoute une variable interindividuelle constituée par le type de cartographie utilisée (avec ou sans cercles) pour la restitution des réponses des sujets.

La comparaison des réponses des sujets sur leurs cartographies avec les positions de référence des cibles a permis d'obtenir deux variables dépendantes constituées par 1) la direction de la cible et 2) la distance. Dans le premier cas, nous avons mesuré les écarts angulaires entre la position GPS des cibles et la position estimée par les participants. La précision en termes de distance est obtenue en vérifiant si la position estimée d'une cible appartient à la bonne plage de distance.

Par ailleurs, chaque cas doit être traité dans un temps limité. Ce temps n'est pas un critère de performance ayant été mesuré. Il a servi à limiter la durée de l'essai et simuler une forme de pression temporelle opérationnelle. Pour un cas à 3 ou 5 items, le temps limite est de 30 secondes, alors que dans les cas à 7 items, le temps limite est de 45 secondes.

Lors du premier cas, le sujet est placé face à la zone principale à observer. Lors des cas suivants, le sujet doit déterminer, seul, la direction dans laquelle il doit regarder.

*\*Nota : Durant les essais, un bug logiciel a compromis le déroulement normal du protocole et provoquant un positionnement incorrect de certains items dont l'ensemble des BFT. Par précaution, tous les essais contenant au moins une cible de ce type ont été rejetés et notamment tous les cas à sept items. Cela implique que la nature de la cible et la complexité de la scène n'ont pu être pris en compte dans le traitement des données mais que seule la distance de la cible fût considérée, c'est-à-dire le type d'item (RFT1, RFT2 ou RFT3).*

### 6.3.1.3 Résultats

Afin d'analyser les données recueillies, trois indicateurs ont été choisis. Le premier concerne la détection (ou non) des items, le deuxième concerne la précision angulaire de positionnement des items sur la cartographie et le troisième concerne la précision de positionnement en distance. Cette section présente les résultats obtenus.

#### 6.3.1.3.1 Détection des items

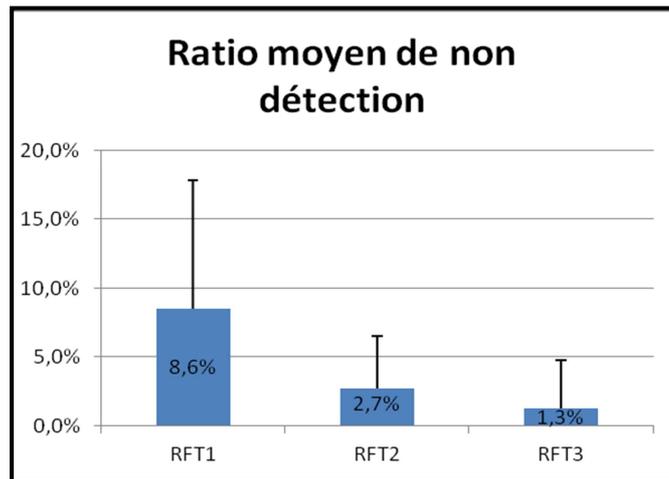


Figure 45 : Ratio de non détection selon le type d'item.

Avant d'aborder les résultats sur la précision des réponses, la figure ci-dessus présente les ratios de non détection qui sont des indicateurs utilisés dans les études précédentes. Avec un taux moyen assez faible, 7.32% de non détection tout item confondu, les scores obtenus ici sont cohérents de ces dernières. En effet, cela rejoint la constatation précédente que lorsque l'attention des participants est focalisée sur l'IHM et non engagée dans une activité dans l'environnement réel, cela réduit le risque de non détection d'évènement. Par ailleurs, lorsque l'on considère les scores des différents items, on constate des différences et notamment un taux de non détection plus important pour les items de type RFT1. Ce résultat peut être expliqué par la nature graphique de ces éléments et notamment leur taille importante qui implique qu'une partie de ces items « déborde » de la surface d'affichage. L'affichage parcellaire de ces représentations graphiques réduit le pouvoir « d'attraction perceptives » de ces items comparativement aux autres, qui sont entièrement visibles sur le restituteur.

Ce constat corrobore les observations des études précédentes concernant l'impact de la représentation graphique sur la capacité de détection d'évènements sur l'IHM.

### 6.3.1.3.2 Précision de positionnement

Afin d'évaluer la précision des réponses des sujets et donc de positionnement des éléments tactiques sur la cartographie, nous considérons deux indicateurs : la distance et la direction. Comme indiqué précédemment, cette IHM représente la distance d'un item selon la plage de distance à laquelle il appartient. Par conséquent, nous avons comparé la distance estimée par les participants à la plage de distance de la cible concernée. Si la distance estimée appartient à cette plage, alors la distance est jugée correcte, sinon elle est erronée. Plus précisément, Si la distance appartient à la plage inférieure, la distance est considérée comme sous estimée et, inversement, surestimée si elle appartient à la plage supérieure. En résumé, il peut y avoir trois types d'erreur, sous estimation, surestimation ou item non détecté.

En ce qui concerne la direction, nous avons mesuré l'écart angulaire entre l'axe de la cible et l'axe de la position estimée. Les résultats ci-après sont exprimés en degrés et présentent les moyennes des valeurs absolues des écarts constatés.

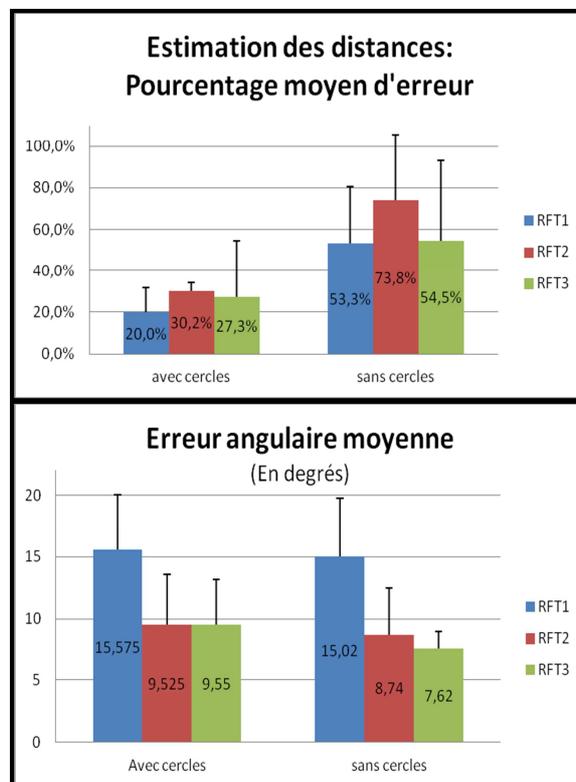


Figure 46 : Résultats moyens sur la précision de positionnement.

Pour le traitement de ces indicateurs, nous avons distingué les résultats issus des deux groupes de participants, afin de vérifier notre hypothèse quant à l'impact du type de cartographie de restitution sur la précision des réponses.

Le premier constat majeur est justement que le type de cartographie influence la précision des réponses et notamment que le groupe « avec cercles » obtient globalement de meilleurs résultats sur l'estimation des distances, quel que soit le type d'item. En revanche, aucune influence majeure n'est constatée sur les écarts angulaires. Les résultats sont sensiblement les mêmes pour les deux groupes, ce qui semble logique dans le sens où les cercles de distance présentés sur la cartographie du groupe 1 ne fournissent aucun repère sur la direction des cibles.

Cependant, on constate un effet de la distance sur la précision angulaire, avec une augmentation de près de 50% de l'erreur moyenne pour les items de type RFT1 comparativement aux RFT2 et RFT3. Malgré tout, les erreurs angulaires sont assez modérées (de 7,62 à 15,58°) et sont cohérentes des marges d'incertitudes représentées par la taille des cercles des items. En effet, compte tenu de l'imprécision des capteurs (GPS et centrale inertielle) il existe une marge d'erreur importante sur la position de la cible et cela se traduit donc par une incertitude sur la position de l'item augmenté à la surface du restitué. Cette incertitude étant constante (une dizaine de mètres environ) quelle que soit la distance de la cible, cela implique que l'erreur angulaire soit plus importante à courte distance et se retrouve dans les résultats des participants. A l'inverse, les résultats sur l'estimation des distances sont faibles, avec des taux d'erreur allant de 20% (RFT1 avec cercles) jusqu'à près de 75% (RFT2 sans cercles), il semblerait que cette tâche soit particulièrement difficile pour les participants et notamment pour ceux du groupe 2.

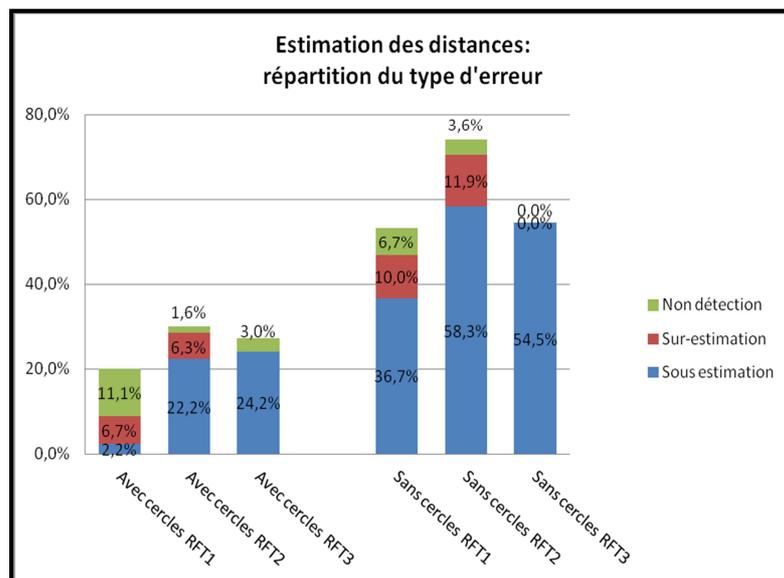


Figure 47 : Répartition des types d'erreur selon le type de carte et d'items.

Si l'on considère la répartition des types d'erreurs, présentée dans la figure précédente, on s'aperçoit que la majorité des erreurs commises sont des sous estimations à l'exception des items RFT1 pour le groupe avec cercles.

En effet, dans ce cas précis, ce type d'item étant le plus proche, les sujets ne peuvent pas confondre et le placer dans une plage de distance inférieure sachant qu'elles sont matérialisées par les cercles sur la carte. Le 2,2% de sous estimation est une valeur résiduelle provoquée par la faible taille de l'échantillon. De même, les items de type RFT3 étant les éléments les plus éloignés, ne peuvent être surestimés car il n'y a pas de plage de distance supérieure. Cela explique l'absence de surestimation par les deux groupes de participants sur cet item.

Finalement, seuls les items de type RFT2 peuvent être positionnés dans une plage de distance incorrecte supérieure ou inférieure par les participants du groupe avec cercles et constituent donc un indicateur important du type d'erreur commis par les sujets. D'ailleurs, on constate qu'il y a 22% d'erreur par sous estimation contre seulement 6.3% de surestimation dans le groupe avec cercles. Cela indique que même avec les cercles sur la cartographie, les sujets effectuent un nombre important d'erreur d'estimation des distances (28.5%) et la grande majorité sont des erreurs de sous estimation. Cette tendance se retrouve dans les résultats du groupe sans cercles et, ce, quelque soit l'item concerné. Globalement, les participants du groupe sans cercles font en moyenne plus d'erreurs que ceux du groupe avec cercles, mais si l'on considère la proportion du type d'erreur, comme indiqué dans la figure suivante, on constate que les ratios sont sensiblement les mêmes.

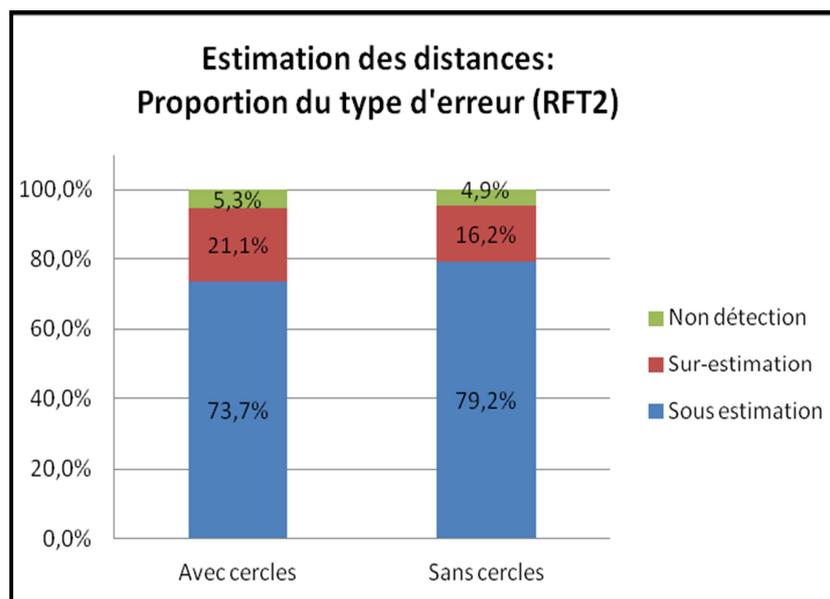


Figure 48 : Proportion du type d'erreur sur l'item RFT2, selon le groupe.

En effet, dans les deux cas, environ 5% des erreurs commises sont des non détection, 21.1% de surestimation contre 16.2% et enfin 73.7% de sous estimation contre 79.2%. Ces différents scores sont assez proches et nous indiquent que le type de cartographie n'impacte pas un type d'échec en particulier mais augmente globalement le nombre d'erreur.

#### **6.3.1.4 Discussion**

Cette étude exploratoire a permis d'évaluer les performances de l'IHM du démonstrateur sur sa capacité à fournir des informations tactiques directement contextualisées dans l'environnement réel de l'utilisateur. Les résultats obtenus mettent en évidence un problème majeur d'estimation des distances dans ce contexte. En effet, même si l'estimation de la direction des cibles était globalement satisfaisante, un taux d'erreur important a été constaté sur la discrimination des plages de distance et, ce, quelles que soient les conditions expérimentales. De plus, l'analyse détaillée des types d'erreurs indique que la majorité des cas est constituée de sous-estimations des distances même pour le groupe disposant de la cartographie avec cercles.

Pour ces participants, la présence des cercles fournissait une aide importante pour le placement des cibles, donc leur tâche consistait plus en une discrimination d'items qu'en une estimation directe des distances. Par conséquent, les erreurs commises peuvent être attribuées à des confusions d'items et pas réellement à une mauvaise estimation de distance. Malgré tout, les résultats indiquent une nette tendance à la sous-estimation, c'est-à-dire à confondre un item avec celui de la plage de distance inférieure. Ce constat reste étonnant dans la mesure où les items de type RFT2 sont graphiquement plus proches des RFT3 que des RFT1. Les raisons qui poussent les participants à davantage confondre les RFT2 avec les RFT1 qu'avec les RFT3 ne sont pas clairement identifiées.

A l'inverse, les participants du groupe 2 n'avaient pas de cercles sur leurs cartographies de réponses et devaient donc estimer eux-mêmes la distance de placement des items. Ici aussi, la distance des cibles étant représentée de façon discrète, les participants ne pouvaient donc pas estimer directement la distance des items mais devaient discriminer la plage de distance correspondante. Les erreurs commises sans les cercles sont donc des difficultés à estimer ces plages de distances sur la cartographie et à placer les cibles en conséquence. Les résultats indiquent que les sujets ont tendance à sous-estimer les bornes de ces plages (50m, 100 et 150 m) ce qui induit les résultats obtenus.

En conclusion, il semblerait que les choix de conception graphique (forme et comportement discret) soient responsables de ces erreurs. La relation arbitraire entre la distance réelle et la représentation graphique des cibles ne permet pas de percevoir directement leur distance et donc l'effort de contextualisation et de spatialisation est supporté par l'utilisateur et non par le système. L'estimation précise des distances est essentielle pour une bonne SA, donc ce problème ergonomique est majeur dans notre contexte.

### **6.3.1.5**      *Limites et perspectives*

Dans cette étude exploratoire, un problème d'estimation des distances a été identifié et les résultats indiquent que ce phénomène est causé par les choix de conception graphique des points d'intérêt. Cependant, cette expérimentation n'a permis d'évaluer qu'un seul type de représentation, il serait donc nécessaire de la reproduire et de comparer différentes représentations graphiques afin de déterminer les aspects qui influencent les performances dans ce type de tâche. Par ailleurs, le prototype évalué ici s'appuie sur un mode de représentation par classe de distance, cet aspect ayant potentiellement influencé les résultats, il serait aussi nécessaire de vérifier si ce problème d'estimation des distances apparaît dans les IHM représentant la distance de façon continue.

## 6.4 CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LES ÉTUDES EXPLORATOIRES

Comme indiqué en préambule, ces études exploratoires ont été effectuées dans le cadre d'un projet industriel réel et non dans un but de recherche. Cela implique que les techniques, les analyses et les résultats obtenus, nécessiteraient d'être affinés et approfondis. Par conséquent, l'application de ces résultats dans un autre contexte doit être précautionneuse. La variété des systèmes de RA implique de nombreuses différences pouvant impacter directement les moyens d'analyses ainsi que les résultats. En d'autres termes, les résultats présentés ici peuvent orienter les recherches sur ces aspects spécifiques, mais des études empiriques doivent être réalisées dans chaque nouveau contexte.

Bien que ces études aient des limitations, elles ont permis de fournir des recommandations pour la conception et le développement du SCIV. Même si toutes n'ont pu être appliquées, ces travaux ont atteint leur objectif d'orienter les choix de conception du point de vue utilisateur. D'un point de vue scientifique, au-delà des résultats en eux-mêmes, il est intéressant de constater que la taxonomie a pu orienter efficacement les études. En retour, les résultats de ces expérimentations ont permis d'alimenter notre retour d'expérience (RETEX) sur les problèmes ergonomiques de ces systèmes. Cela améliore ainsi notre connaissance des avantages et inconvénients théoriques de ces catégories de restitués et pèseront donc dans la balance lors de la prochaine application de la méthode.

En résumé, ces études exploratoires ont encouragé la poursuite de l'élaboration d'un framework pour l'analyse et l'évaluation et notamment sur sa pertinence et *son applicabilité* en milieu industriel. L'application de cette méthodologie a été utile pour l'évaluation de systèmes, mais elle peut aussi l'être pour la conception. La section suivante présente les résultats obtenus par cette méthode dans les phases de créativité, lors de la recherche de nouveaux concepts d'application de la RA au domaine du fantassin.

Cependant, la problématique de la perception des distances relevée ici, représente un risque critique dans notre contexte d'application. En effet, la RA ne fournit un gain potentiel que si le fantassin est assuré de percevoir les informations tactiques à leur position exacte dans le monde physique. Autrement dit, une erreur d'estimation des positions des alliés, mais surtout des adversaires, peut être mortellement fatale pour l'utilisateur et ce n'est pas acceptable.

Tant qu'un risque de cette envergure persistera, la RA ne peut être appliquée de façon sûre dans le domaine du fantassin. Par conséquent, cette problématique devient prioritaire et les prochaines études présentées dans ce manuscrit s'intéresseront essentiellement à cette dernière.



# 7. APPLICATION DE LA TAXONOMIE À LA CONCEPTION

---

## 7.1 INTRODUCTION

La taxonomie proposée dans ce document a été appliquée dans le cadre d'évaluations ergonomiques d'un système de RA pour le soldat. En parallèle de ces études, des travaux de prospection ont été menés afin d'identifier de nouvelles applications de la RA dans le contexte du fantassin débarqué.

Une démarche top-down a été mise en place, en s'appuyant sur la taxonomie WOTSH&R et particulièrement sur la classification des types d'espaces perceptifs augmentés. En effet, chaque type d'espace a été passé en revue pour déterminer ceux qui n'étaient pas encore appliqués dans le domaine militaire. L'espace de type H (head) est d'une certaine manière, le premier type d'espace exploité et notamment via les interfaces de HUD présentes dans les avions de chasse et hélicoptères militaires. L'espace de type W (world) et par extension l'espace O (Object) sont aussi déjà mis en œuvre dans le domaine du militaire et notamment dans le projet américain BARS ou même dans le projet SCIV présenté ici. Les espaces perceptifs S(Surround) et T(Tag) sont les deux types dont aucun exemple d'application existante n'a pu être trouvé dans le domaine militaire. Ensuite, à partir de l'analyse des avantages et limitations intrinsèques de ces espaces et de la revue de la littérature, de nouveaux concepts d'interfaces ont été proposés.

Dans un premier temps, certains de ces concepts ont été maquetés en s'appuyant sur la bibliothèque de recalage ARtoolKit et sur une simple webcam. Cela a permis de sélectionner les applications les plus prometteuses et de poursuivre leur développement dans un second temps.

Les deux démonstrateurs présentés dans la section suivante sont le résultat de ce cycle de conception préliminaire. Cela a abouti au développement de maquettes interactives fonctionnelles ayant été utilisées, à de nombreuses reprises, lors de présentations internes officielles (journée de l'innovation, etc.) et notamment à des officiers de l'état major de l'armée de terre française. Ils ont ainsi permis d'illustrer des concepts d'interfaces innovantes pouvant potentiellement être appliqués au domaine du fantassin du futur.

## 7.2 DEMONSTRATEUR 1 : LE CONCEPT D'IHM RA SUR ARME ET INTERACTION PSEUDO-TANGIBLE

Ce premier démonstrateur consiste en l'application du concept d'espace de type T. Ce système est basé sur un restituteur HMD monoculaire *optical see-through*, soit le type 1 dans la classification.

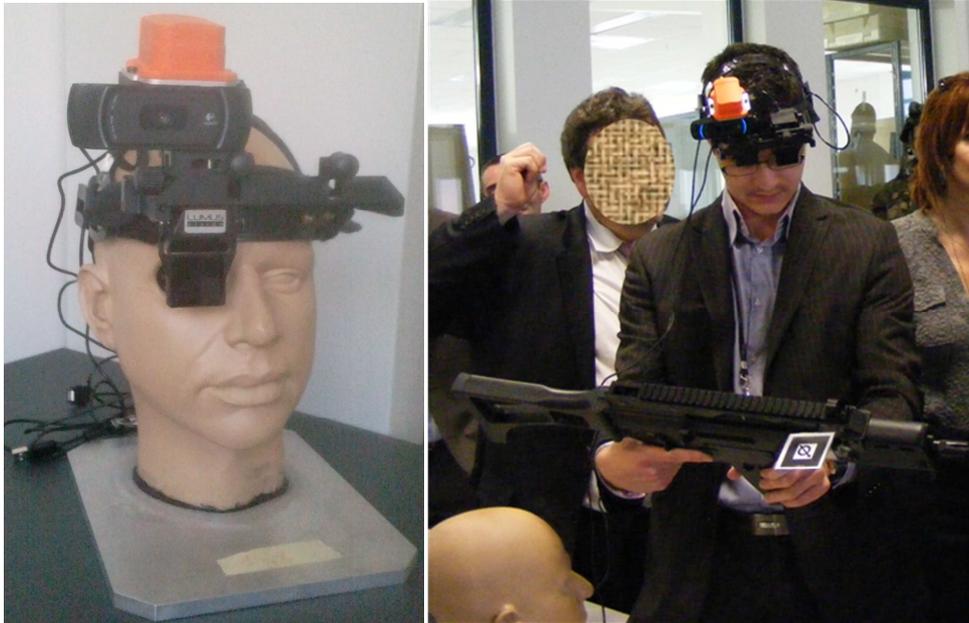


Figure 49 : Illustration du matériel du démonstrateur Tag RA sur l'arme d'un fantassin.

Ce dernier est équipé d'une caméra et permet d'afficher une interface de Type T avec une incrustation comportementale des éléments virtuels sur l'arme ou le bras de l'utilisateur.

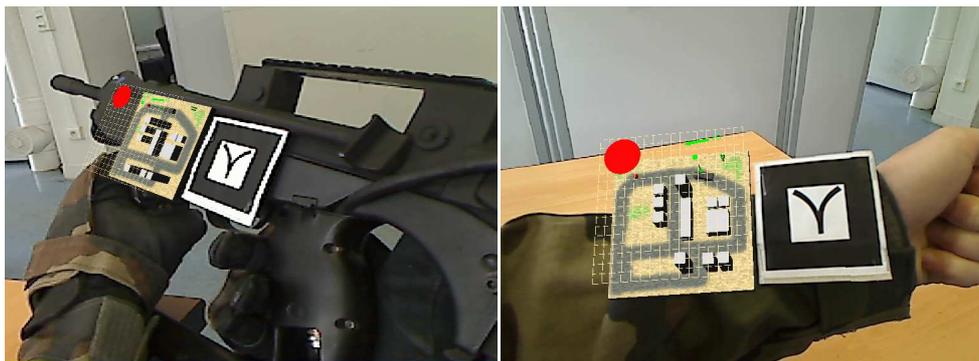


Figure 50 : Illustration du rendu de l'IHM en RA sur l'arme et sur le bras du point de vue de l'utilisateur.

Dans une seconde version du démonstrateur, une possibilité d'interaction pseudo-tangible a été ajoutée.

En effet, dans cette évolution, des boutons virtuels sont affichés et l'utilisateur peut « appuyer » dessus pour interagir avec le système. En réalité, le système détecte que ces zones réactives sont masquées par le doigt de l'utilisateur (i.e., la caméra ne les détecte plus) et donc cela exécute la fonction associée au bouton masqué. Comme le montre la figure suivante, le bouton masqué devient vert pour informer l'utilisateur de son activation.



Figure 51 : Illustration de l'interaction pseudo-tangible avec l'IHM de RA sur l'arme d'un fantassin.

Le recalage est basé sur la détection et la reconnaissance d'un patch spécifique positionné sur l'arme ou le bras de l'utilisateur (voir figure ci-dessous). Cela permet ainsi d'afficher l'IHM de RA correctement positionnée dessus.



Figure 52 : Illustration du principe de recalage par marqueur : le patch « camouflé » (à g.) et l'IHM de RA affichée dessus (à d.).

D'un point de vue ergonomique, ce type d'IHM permet de dématérialiser les périphériques de consultation du système d'information du fantassin. En effet, ce dernier peut consulter et interagir avec l'interface de son système tactique sans avoir à déployer un écran tactile déporté et sans quitter son arme des mains. Outre la réduction de masse et du nombre de mouvements nécessaires, cela permet potentiellement de faciliter la prise en compte des informations tactiques. De plus, cela réduit potentiellement le temps de focalisation attentionnel hors de son environnement réel. En résumé, ce principe d'interface permet de réduire les temps de consultation du système tactique où le fantassin est immobile et donc vulnérable.

Cependant, ce démonstrateur n'est qu'une preuve de concept et nécessite de plus amples travaux pour le rendre utilisable dans un contexte réel d'utilisation. En effet, l'une des principales limitations de ce système est liée à la fiabilité de détection. Dans un environnement lumineux extérieur réel, la technique de recalage basée sur des marqueurs serait trop durement éprouvée et montrerait vite ses limites. Les variations de luminosité et les ombres risquent de dégrader les performances de détection et même de provoquer des activations intempestives des boutons (faux positifs). Même si cela ne remet pas en question le concept de cette interface, une autre technique de recalage doit être mise en œuvre pour une qualité d'utilisation optimale.

Enfin, la position des doigts n'étant pas détectée, l'IHM est toujours affichée au dessus des mains de l'utilisateur. La gestion de l'occlusion par les mains permettrait de passer ce système dans la catégorie au-dessus dans la classification. Le passage d'une « incrustation sémantique » à une « intégration sémantique » permettrait d'améliorer potentiellement l'ergonomie de cette IHM. Cette problématique de détection des doigts a été abordée lors de la conception du démonstrateur présentée dans la section suivante.

### 7.3 DEMONSTRATEUR 2 : LE CONCEPT D'IHM RA SPHERIQUE ET INTERACTION GESTUELLE

Ce deuxième concept d'interface pour le fantassin est un système basé sur un restituteur binoculaire *video see-through* (de type 16 dans la classification WOTSH&R) présenté dans la figure suivante.



Figure 53 : Illustration du restituteur Vuzix WRAP 920AR utilisé dans le deuxième démonstrateur.

Il permet d'afficher une IHM de RA de type S. Autrement dit, les éléments virtuels sont comme « projetés » sur une bulle invisible autour de l'utilisateur. Il suffit que ce dernier oriente son point de vue vers le bas pour percevoir la carte tactique de son environnement (voir illustration suivante).

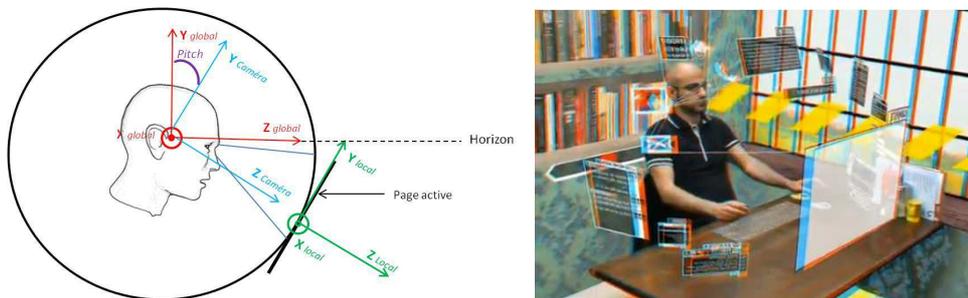


Figure 54: Illustration du principe du démonstrateur de RA de type Surround (S).

Comme l'illustre la figure ci-dessous, l'utilisateur interagit directement avec cette IHM en saisissant naturellement les éléments virtuels avec les doigts. Il peut donc ainsi déplacer les « pages » de l'IHM par un simple geste de la main, saisir un élément de la carte tactique ou consulter sa messagerie. Dans les systèmes de RA de type S, il n'y a pas besoin de brique de recalage à proprement parlé. En effet, ce type d'interface ne nécessite pas de connaître l'arrière plan réel pour fonctionner. Dans ce cas de figure, l'interaction entre le réel et le virtuel est fournie par la détection des doigts de l'utilisateur et de l'orientation de sa tête.

La technique utilisée ici repose sur la détection et le suivi des pastilles de couleurs dans la vidéo. Au-delà de la position dans le plan image (X, Y) la notion de distance (ou profondeur) est prise en compte. Autrement dit, la position des doigts dans l'image ainsi que leur distance sont nécessaires pour l'interaction. L'inconvénient de cette approche est que la technique qui permet de déterminer la distance (Z) est assez peu précise. La position exacte des doigts n'est pas connue, il y a une marge d'erreur de plusieurs centimètres dans la profondeur. Cette limitation nuit à l'apprentissage et à l'élaboration du couplage sensori-moteur (accord entre la position « proprioceptive » du doigt et feedback visuel de la distance de l'objet). Ce problème entrave la constitution d'un espace perceptif homogène, car une des trois dimensions (la profondeur) des éléments virtuels n'est donc pas cohérente du reste de l'espace perceptif. Par ailleurs, même si la position des pastilles de couleur est détectée, la position des mains et des doigts ne l'est pas. Le système incruste donc l'IHM de RA dans l'image indépendamment de la position des mains de l'utilisateur, il s'agit d'une « incrustation comportementale ». Par conséquent, comme le montre la figure suivante, les mains de l'utilisateur sont toujours perçues « derrière » la cartographie, ce dernier ne pouvant donc pas les voir. Pour amoindrir cet effet, un cercle de la couleur des pastilles s'affiche au dessus de l'IHM, afin de fournir à l'utilisateur un feedback sur la position et le déplacement de son « point d'interaction ». Si le bouclage sensori-moteur se faisait correctement, l'ajout de ce feedback n'aurait pas été nécessaire.

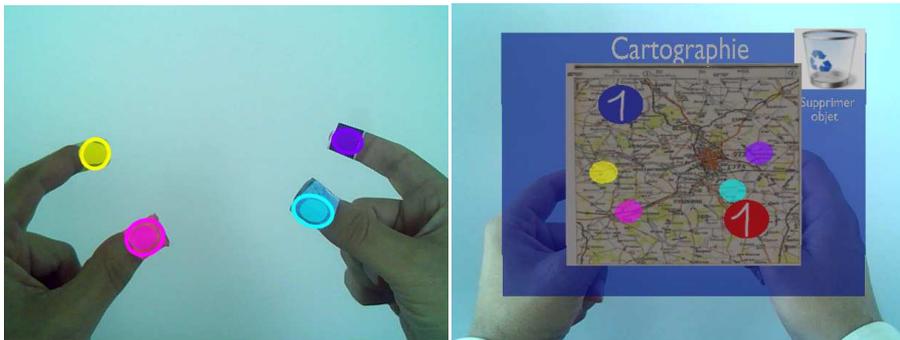


Figure 55 : Illustration du principe d'interaction gestuelle employé. Les pastilles de couleur sur les doigts sont détectées et permettent d'interagir avec l'interface.

Le problème soulevé ici est que les déplacements des mains de l'utilisateur ne sont pas cohérents avec les informations fournies par son système visuel. Autrement dit, lorsque l'utilisateur tend sa main pour « toucher » l'IHM, cette dernière ne renvoie aucun feedback tactile naturellement attendu dans ce type de situation. A l'inverse, le système visuel perçoit les mains derrière l'IHM, ce qui n'est pas possible en connaissant la position réelle des membres du corps. Cette situation est un exemple typique d'une rupture de l'illusion que les éléments virtuels et l'environnement réel appartiennent au même espace perceptif.

L'interaction est donc biaisée. Même l'élaboration d'un espace de type T nécessite une intégration homogène avec son référent pour être perçu comme augmenté. Ces nouveaux systèmes de RA (S et T) nécessitent aussi d'être évalués, car il est fort possible que chaque type de RA ait des problématiques spécifiques, telle que la perception des distances pour les interfaces de type W (World).

## **7.4 CONCLUSION**

Comme nous venons de le présenter, cette taxonomie n'a pas seulement une portée heuristique évaluatrice mais aussi conceptrice. Elle peut être utilisée dans les étapes de créativité afin d'inspirer de nouveaux concepts d'application de la RA. De plus, cette méthode a été mise en place dans un cadre de R&D réel, ce qui conforte son applicabilité industrielle. Cependant, Les deux applications présentées ici ne sont que des preuves de concept présentant une faible maturité technologique et qui n'en sont qu'aux tous premiers stades du processus industriel. Autrement dit, la réalisation d'un produit de ce type nécessiterait de plus amples travaux tant d'un point de vue technologique (restituteur et méthode de recalage), que du point de vue ergonomique. En effet, l'utilisabilité et l'utilité de ces concepts d'interfaces nécessitent d'être évaluées empiriquement. Ainsi, les problèmes prioritaires et spécifiques de ce type d'interface pourront être identifiés et pris en compte au plus tôt dans la conception. C'est d'ailleurs cette logique qui a guidé la suite de ce manuscrit, en présentant les travaux justement appliqués à l'une des priorités ergonomiques des espaces W et O, la problématique de la perception incorrecte des distances. Comme indiqué précédemment, ce phénomène a été constaté lors des études exploratoires menées sur le SCIV et son importance a été confirmée par la revue de la littérature présentée à la section 3.4. En considérant la criticité et la probabilité d'apparition de ce phénomène de sous-estimation des distances, nous avons considéré qu'il était urgent de trouver des solutions applicables rapidement dans la conception du SCIV. La première des trois études suivantes a justement été réalisée sur la base du prototype de ce projet. Mais en raison de certaines de ses limitations, les deux expérimentations suivantes ont été menées avec un nouveau système de RA spécifiquement conçu pour ces études.



# **Problèmes de perception des distances en RA**



## 8. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DE LA PERCEPTION DES DISTANCES EN RA

---

Les études exploratoires présentées dans la section Évaluation de la compréhension de la situation 6.3 ont mis en évidence un problème majeur de perception des distances. Les participants de ces expérimentations ont eu des difficultés importantes à interpréter correctement la position des éléments tactiques virtuels dans l'environnement réel. En effet, les résultats indiquent que les utilisateurs commettent beaucoup d'erreurs (de 20% à 75% selon le type d'élément affiché) et qu'il s'agit majoritairement de sous-estimation des distances.

Dans le contexte du fantassin débarqué, cette problématique se révèle critique car l'interprétation erronée de la position des alliés et des ennemis sur le champ de bataille peut avoir des conséquences dramatiques dans ce type d'activité. Tant qu'un problème de cette envergure ne sera pas maîtrisé, le déploiement de la RA ne sera pas possible dans ce domaine d'application.

Afin de vérifier si ce problème constaté est spécifique à notre système, une revue de la littérature sur la perception des distances en RA et RV a été réalisée (voir section 3.4). Finalement, il s'avère que cette problématique est bien connue de la communauté scientifique et qu'elle apparaît de façon récurrente dans de nombreuses études. Même si les causes précises de ce phénomène ne sont pas encore clairement identifiées, plusieurs pistes pour réduire cet effet ont été identifiées. Les solutions applicables dans notre contexte ont été sélectionnées et évaluées au travers d'études expérimentales présentées ci-après.

La première étude s'intéresse à la prise en compte des indices de profondeur lors de la conception des IHM de RA pour évaluer si la représentation graphique des éléments virtuels peut influencer la précision d'estimation de leurs distances.

La deuxième étude s'intéresse à l'effet de la dominance oculaire et à l'effet de l'apprentissage via la présentation d'un feedback sur l'estimation des distances.

Ces trois hypothèses ont été sélectionnées car, selon les résultats, elles pourront être appliquées lors de la conception et de l'utilisation d'un système de RA monoculaire pour le fantassin débarqué.

## 8.1 EFFET DE LA REPRESENTATION GRAPHIQUE

### 8.1.1 Rappel des objectifs et hypothèses

Dans certains contextes (dont militaire), les éléments de RA sont affichés à des distances allant au-delà de 20m, ce qui correspond à l'espace d'action (*Action Space*) et à l'espace de visualisation (*Vista Space*). Selon les travaux de Cutting et Vishton (1995), les indices les plus efficaces dans ces espaces sont, par ordre d'importance, l'occlusion, la hauteur dans le champ visuel et la taille relative. Le rôle et l'impact de certains de ces indices ont été étudiés dans le cadre de la perception en réalité virtuelle et augmentée et les résultats de ces travaux semblent indiquer que la prise en compte de ces aspects améliore l'estimation des utilisateurs (Jurgens et al., 2006; Wither & Hollerer, 2005).

A notre connaissance, aucune étude n'a été faite dans le cadre d'IHM de type discrètes, c'est-à-dire lorsque la distance d'un objet est représentée par un nombre fini d'état correspondant à plusieurs catégories de distances (par ex. de 10m à 50m, de 50 à 100m, et au-delà de 100m). Dans ce type d'interface, sous-estimer la distance d'un élément virtuel reviendrait à confondre la catégorie de distances présentée.

Ce chapitre présente les résultats d'une étude au cours de laquelle les participants devaient discriminer la catégorie de distances et la nature de point d'intérêt en RA. Différents modes de représentation ont été conçus à partir de la combinaison des indices de profondeurs cités précédemment. L'objectif était donc ici de comparer leurs effets sur la capacité de discrimination des distances dans une IHM de type discrète.

## 8.1.2 Méthode

### 8.1.2.1 Participants

Sept personnes (6 H, 1 F) âgées de 23 à 46 ans ( $M = 30$  ;  $ET = \pm 8$  ans, BAC+5 ou plus) ont participé à l'étude. Elles présentaient une vue normale ou corrigée à la normale, n'étaient pas familières de l'usage de HMD ou de système de RA, et n'avaient aucune expérience des IHM utilisées lors du protocole.

### 8.1.2.2 Matériel et tâche expérimentale

Le dispositif d'évaluation comportait un ordinateur portable (AlienWare M17x) ainsi qu'un restituteur monoculaire Lumus PD-18 de type *optical see-through* compatible avec le port de lunettes de correction. Le restituteur était positionné devant l'œil droit pour tous les sujets. L'examineur déclenchait manuellement un chronomètre à l'apparition de l'IHM dans le HMD et le stoppait à l'instant où le sujet signalait qu'il avait fini de placer tous les points sur la grille papier.

#### 8.1.2.2.1 Les représentations graphiques

Cinq IHM ont été conçues afin de représenter de façon différente des points d'intérêt, c'est-à-dire la position d'un élément dans l'environnement réel ainsi que sa zone d'incertitude. Ces cinq modes de représentation (voir figure suivante) peuvent être regroupés en 3 catégories qui se distinguent par des combinaisons d'indices de profondeur différentes : La catégorie « cercle » (IHM1) utilise la taille relative et l'occlusion, la catégorie « ligne » (IHM2 et 5) utilise la taille relative et la hauteur dans le champ visuel mais pas l'occlusion. L'IHM5 se distingue de la 2 par le positionnement différent de la sphère sur la ligne d'incertitude en fonction de la catégorie de distance. La catégorie « aplat » (IHM3 et 4) utilise la taille relative, la hauteur dans le champ visuel et l'occlusion partielle (semi-transparence). L'IHM 4 se distingue de la 3 par l'emploi d'un dégradé de transparence plus important vers les bords extérieurs du point d'intérêt.



Figure 56: Illustration des cinq types (d'IHM1 à g. à IHM5 à d.) de représentation de points d'intérêt, avec un exemple dans chaque catégorie de distance.

#### 8.1.2.2.2 Les scènes

Pour chaque IHM, différentes scènes ont été représentées. Ces scènes étaient distinguées selon qu'elles présentaient aléatoirement un seul point d'intérêt (cas simples) dans une des catégories de distance, ou des cas complexes, c'est-à-dire où 3 à 5 points d'intérêt étaient présentés. Dans ces cas

complexes, les points pouvaient être affichés dans différentes catégories de distance et certaines scènes présentaient simultanément des alliés (points bleus) et des ennemis (points rouges).

#### 8.1.2.2.3 *Tâche expérimentale*

Les participants devaient observer une scène présentée en RA puis la retranscrire sur une carte papier présentant les trois catégories de distance. Ils devaient inscrire, le plus rapidement possible, le ou les points rouges ou bleus (selon la nature des éléments virtuels) à la bonne position. L'expérimentation (consignes, familiarisation, calibration, tâche et pause comprise) durait environ une heure par sujet.

#### 8.1.2.2.4 *Données recueillies*

L'étude a été conçue comme un protocole intra-individuel à deux facteurs : type d'IHM (5) et type de situation (2). Chaque sujet effectuait la tâche expérimentale sur toutes les combinaisons possibles. On obtient donc 7 (sujets) × 5 (IHM) × 11 cas (6 cas simples et 5 cas complexes). Chaque participant a donc été soumis à 55 essais.

Les variables dépendantes étaient : (a) le temps (t) total de réalisation de la tâche (variable continue), et (b) la justesse des réponses pour chaque point d'intérêt (variable discrète : bon ou faux × n points) obtenue après le protocole en comparant les réponses papiers des sujets à la configuration effective de chaque scène. Il est à noter que seule la couleur de chaque point (c.-à-d. bleu ou rouge) et son positionnement dans la bonne catégorie de profondeur dans la grille (i.e. proche, intermédiaire, éloigné) a été pris en compte lors du traitement.

## 8.1.3 Résultats

### 8.1.3.1 Temps moyen de réalisation des tâches

Le temps moyen de réalisation des tâches a fait l'objet d'une analyse de variance pour mesures répétées (facteurs « complexité » et « IHM »). Les analyses indiquent que le temps moyen est influencé par la complexité des situations ( $F(1, 54) = 181,48$  ;  $p = 0,000$ ). Si les participants mettent en moyenne 3,73s ( $ET = 1,12$ ) à réaliser la tâche dans les cas simples, ils mettent en revanche 9,28s ( $ET = 2,47$ ) dans les cas complexes. Le type d'IHM est aussi un facteur qui influence le temps moyen de réalisation de la tâche. L'analyse indique un effet significatif pour ce facteur ( $F(4, 54) = 3,74$  ;  $p = 0,0093$ ).

Les analyses a posteriori (Tukey HSD, Tukey-Kramer, Fisher-Hayter) indiquent toutes que ces différences se retrouvent de façon significative entre l'IHM 1 et l'IHM 2 et entre l'IHM 1 et l'IHM 5. Avec l'IHM 1, les participants mettent en moyenne 7,87s ( $ET = 4,41$ ) pour réaliser la tâche alors qu'ils mettent respectivement 5,68s ( $ET : 2,62$ ) et 5,80s ( $ET : 3,19$ ) avec les IHM 2 et 5. Aucune autre différence statistique n'est observée entre les autres IHM. Notons, par ailleurs, que l'interaction des facteurs « complexité » et « interfaces » n'est pas statistiquement significative ( $F(4, 54) = 1,36$  ;  $p = 0,2613$ ).

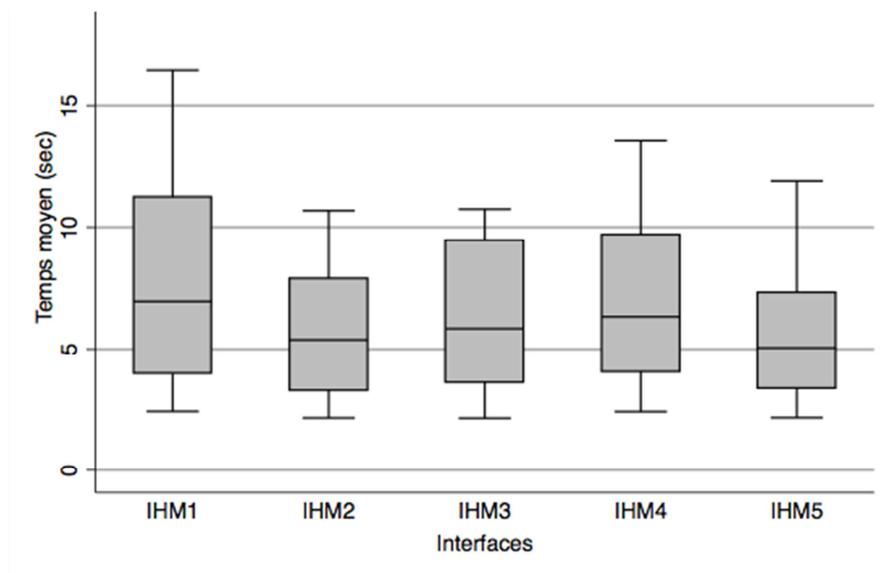


Figure 57 : Box plot des moyennes des temps de réalisation des tâches en fonction des IHM.

### 8.1.3.2 La précision des réponses

L'analyse des résultats concernant les pourcentages moyens de bonnes réponses ne peut se faire à l'aide des analyses de variance. Ces données ont donc été analysées grâce à des tests de médiane. Globalement, les cas simples entraînent des bonnes réponses dans 93,24% des cas, et 89,21% dans le cas des situations complexes.

Lorsque l'on s'intéresse aux IHM, les pourcentages moyens sont respectivement de 83,54%, 86,49%, 90,03%, 97,26% et 98,81% pour les IHM 1, 3, 4, 2 et 5. Les IHM 2 et 5 sont donc les plus performantes. S'il n'est pas possible de faire des tests entre les IHM pour les situations simples compte tenu de la distribution des pourcentages, le  $\chi^2$  de Pearson indique cependant que les IHM diffèrent en termes de distribution des pourcentages par rapport à la médiane ( $\chi^2(4) = 25,85$  ;  $p = 0,000$ ) pour les situations complexes. Le nombre de participants ayant des pourcentages au dessus de la médiane est plus important pour les IHM 2 et 5. Les IHM 1 et 3 sont celles pour lesquels les participants ont les pourcentages les plus faibles (voir Tableau 23).

		IHM					
Sup. à la Médiane		1	2	3	4	5	Total
Non		6	0	7	5	0	18
Oui		1	7	0	2	7	17
<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>35</b>

Tableau 23. Distribution des participants selon que leurs pourcentages de bonnes réponses est supérieur ou non à la médiane, pour chacune des interfaces.

Si l'on compare, pour chacune des IHM, les pourcentages pour les situations simples et complexes, on constate 3 cas de figure : dans le premier cas, aucune différence statistique n'apparaît dans la distribution des effectifs en fonction de la médiane. C'est le cas des IHM 1 et 4. Dans le deuxième cas de figure, on observe une différence significative selon la complexité des situations. C'est le cas de l'IHM 3 ( $\chi^2(1) = 5,6$  ;  $p = 0,018$ ). Cette IHM pose des problèmes aux participants dans les situations complexes. Tous les participants ont des pourcentages inférieurs à la médiane alors qu'ils sont à peu près répartis également dans les situations simples.

Le troisième cas de figure concerne les IHM 2 et 5. Pour ces 2 IHM, tous les pourcentages de bonnes réponses sont très élevés (supérieur à 97%). En résumé, les IHM 2 et 5 obtiennent de meilleures performances que toutes les autres.

### 8.1.3.3 *Ratio temps/bonne réponse*

Afin de pouvoir départager objectivement les IHM entre elles, nous avons souhaité prendre en compte autant les performances en termes de rapidité que de précision des réponses. Pour cela, nous avons intégré ces deux aspects en un seul indicateur. Cette métrique, qui consiste à diviser le temps de la tâche par le nombre de bonnes réponses, représente finalement le temps nécessaire pour fournir une bonne réponse et procure une estimation de la performance globale. L'analyse des résultats concernant ce ratio confirme les tendances précédemment identifiées.

Les analyses de variance pour mesures répétées indiquent que le facteur « complexité » entraîne des effets significatifs sur le ratio ( $F(1, 54) = 31,05$  ;  $p = 0,0000$ ). Si le ratio est de 4,15 ( $ET = 1,73$ ) pour les situations simples, il est de 2,60 ( $ET = 0,88$ ) pour les cas complexes.

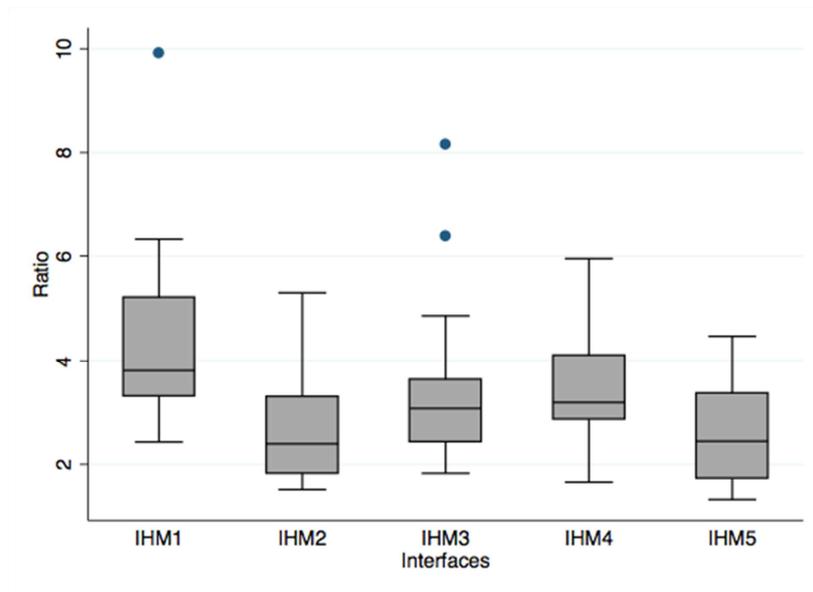


Figure 58 : Ratio moyen par catégorie d'IHM (en secondes).

Les analyses montrent par ailleurs que le facteur « interface » est lui aussi statistiquement significatif ( $F(4, 54) = 5,08$  ;  $p = 0,0015$ ). Tout comme les résultats des analyses *a posteriori* sur les temps de réalisation des tâches, les différences statistiques (test de Tukey HSD, valeur critique ( $,05, 5, 54) = 3,99$ ) sont observées entre les IHM 1 ( $M = 4,40$ ) et 2 ( $M = 2,79$ ) (HSD-Test =  $5,1625^*$ ) et entre les IHM 1 et 5 ( $M = 2,64$ ) (HSD-Test =  $5,63$ ), ce qui représente une amélioration des performances de 36.6% et 40%. Aucune autre différence statistique n'est observée entre les autres IHM, et l'interaction des facteurs « complexité » et « interface » n'est pas significative ( $F(4, 54) = 0,13$  ;  $p = 0,9717$ ).

#### 8.1.4 Discussion

Globalement, l'IHM1 obtient de moins bons résultats que les autres, et inversement, les IHM2 et 5 fournissent les meilleures performances. Les résultats obtenus peuvent s'expliquer par deux raisons principales : 1) l'effet des indices de profondeurs, et 2) le respect des critères ergonomiques (CE)(Scapin & Bastien, 1997).

L'utilisation des indices de profondeur lors de la conception de chaque IHM a permis de limiter de façon importante le phénomène de sous-estimation rencontré dans la littérature.

Paradoxalement, l'IHM1 qui utilise l'occlusion (qui est l'indice de profondeur le plus efficace) obtient de moins bons résultats que les IHM utilisant plutôt la hauteur dans le champ visuel. Cependant, cette seule raison ne suffit pas à expliquer totalement les résultats obtenus. En effet, les IHM de type lignes et celles de type aplats incluant pourtant la hauteur dans le champ visuel obtiennent des résultats différents. La différence ici, est l'utilisation de l'occlusion partielle (transparence) pour les aplats. Ainsi, il semblerait que ce ne soit pas la hauteur dans le champ visuel qui améliore les performances mais l'occlusion (même partielle) qui les limite. Par ailleurs, l'analyse qualitative des réponses montre que la majorité des erreurs est constituée d'oublis ou d'erreurs sur la nature (couleur) des points d'intérêt et non pas un problème d'estimation de leur distance.

L'occlusion est certes l'indice de profondeur le plus efficace, et permet de percevoir de façon absolue la position egocentrique relative (quel élément est devant l'autre) mais dans la situation étudiée ici, dégrade l'utilisabilité globale de l'IHM et particulièrement le critère ergonomique de « lisibilité ». Que ce soit dans le cas des IHM cercles ou aplats, le nombre d'erreur lié au masquage est inacceptable. La non-détection ou l'erreur d'identification d'un point d'intérêt peut être particulièrement critique dans le domaine militaire.

Par ailleurs, dans l'IHM1, la séparation graphique entre les points et leurs zones d'incertitude (cercles) constitue un non respect du critère de « groupement par la localisation » et semble contribuer à la mauvaise utilisabilité de l'IHM. Il est plus difficile dans ce cas là, de déterminer la relation entre le point et son incertitude et donc, de percevoir à quelle catégorie de distance il appartient.

Les IHM de type ligne obtiennent de bons résultats par l'absence d'erreurs liées à l'occlusion (masquage) et une bonne discrimination des catégories de distance. Il semblerait que la combinaison des différents indices de profondeur participe au respect du CE de « distinction par le format » particulièrement important dans ce type de tâche. En outre, le positionnement différent de la sphère sur la ligne d'incertitude en fonction de la catégorie de distance dans l'IHM5 amplifie la distinction par le format, même si aucune différence statistique significative n'a été montrée dans les performances.

La perception correcte des distances des points d'intérêt est essentielle dans les contextes critiques tel que celui du fantassin, mais cette précision d'estimation ne doit pas se faire au détriment de l'utilisabilité classique de l'IHM. Les résultats préliminaires, présentés ici, indiquent que : i) la prise en compte des indices de profondeur favorise l'estimation des distances, et ii) même dans le cadre d'un domaine émergent tel que la RA, un bon respect des CE favorise l'utilisabilité de l'IHM.

### 8.1.5 Limites et perspectives

L'étude présentée ici s'est appuyée sur le prototype de RA identique à celui décrit dans les études exploratoires. Compte tenu de certaines limitations technologiques et choix de conception, plusieurs aspects limitent la portée des évaluations réalisables sur ce dernier.

Tout d'abord, les performances graphiques du système restreignent les possibilités d'affichage et de conception d'IHM et notamment la gestion d'objet 3D. De plus, la précision intrinsèque des capteurs employés pour le recalage (GPS et centrale inertielle) induit une incertitude importante sur la position des éléments à afficher. La combinaison de ces deux aspects limite les choix de conception graphique à des items simples en deux dimensions et de taille importante pour tenir compte du degré d'incertitude. Par ailleurs, le système ayant été initialement conçu pour présenter l'information de distance de façon discrète, il n'était pas possible de modifier ce comportement des points d'intérêts. Par conséquent, le système ne permettant pas d'implémenter une solution basée sur une représentation continue de la distance, il n'est pas possible d'évaluer la perception des distances sur ce type d'IHM.

Enfin, la conception mécanique du restituteur de ce prototype ne permettait pas de choisir le côté de positionnement. Le placement du HMD sur l'œil droit, sans tenir compte de la dominance oculaire, constitue potentiellement une limite à cette expérimentation.

Afin de contourner ces différentes limitations, nous avons conçu un autre prototype permettant de les intégrer. Dans les études suivantes, nous avons évalué la perception des distances d'objet virtuel en 3D et dans le cadre d'une représentation continue de la distance. De plus, nous avons employé un restituteur binoculaire permettant ainsi de choisir le côté d'affichage. Le système sera décrit plus en détail dans le chapitre suivant.

## 8.2 EFFET DE LA DOMINANCE OCULAIRE ET DE L'APPRENTISSAGE

Dans notre contexte d'application, les systèmes de RA, que nous étudions, sont voués à être employés par des fantassins débarqués en situation de combat terrestre. L'évolution des conflits armés tend vers des affrontements asymétriques en environnement urbain voire périurbain. La nature imbriquée de ces missions rend essentiel la bonne localisation et identification des individus présents sur le théâtre des opérations. Ainsi, connaître précisément la position des alliés et des menaces et cela, en temps réel, fournit potentiellement un gain opérationnel conséquent.

Dans ce type de contexte, la RA doit permettre d'afficher des informations sur des éléments tactiques situés à moyenne et longue distances. De plus, compte tenu de l'activité du fantassin (perception directe de son environnement, utilisation d'armes, forte mobilité, etc.) l'emploi d'un système peu intrusif est indispensable.

Comme le montre la littérature sur la perception (voir 3.3.3), les principaux indices de profondeur utilisés à ces classes de distance sont essentiellement monoculaires (occlusion, hauteur dans le champ visuel, taille relative, perspective de mouvement). En outre, l'intégration de ces indices dans la conception d'une IHM de RA étant relativement aisée, l'utilisation d'un restituteur monoculaire semble donc pertinente.

Cependant, une question demeure sur le choix du positionnement du restituteur et donc de l'impact de la dominance oculaire sur ce type de tâche perceptive. Dans la littérature, la dominance oculaire est étudiée depuis de nombreuses années (Merrell, 1957) et même si plusieurs théories s'opposent (Mapp, Ono, & Barbeito, 2003), la communauté psycho-physicienne tend vers le consensus qu'il existe une différenciation fonctionnelle visuelle. De là, les effets de la dominance oculaire ont été principalement étudiés dans le sport et particulièrement dans les tâches de coordination œil-main (Azémar, Stein, & Ripoll, 2008). Mais, à notre connaissance, aucune étude n'a évalué son impact sur le processus de perception des distances et de la profondeur. De même, dans le domaine de recherche en IHM et plus particulièrement en Réalité virtuelle et augmentée, la dominance oculaire n'a été que très rarement abordée et à notre connaissance, jamais dans un contexte de perception des distances.

Dans les travaux présentés ici, nous nous intéressons donc à la perception des distances et plus précisément au phénomène de sous-estimation globalement rapporté dans la littérature. Notre objectif est d'identifier l'importance de ce phénomène ainsi que les moyens de le réduire.

Afin de fournir des recommandations pour la conception, nous souhaitons étudier l'effet de la dominance oculaire sur ces problématiques de perception.

Comme indiqué dans l'étude précédente, les contraintes techniques du prototype utilisé limitaient les possibilités expérimentales. Les travaux présentés ici se sont donc basés sur un autre système de RA binoculaire permettant notamment de choisir le côté d'affichage de l'interface de test.

De plus, comme le montre notre revue de la littérature (voir 3.4.2.2), l'apprentissage semble avoir un effet positif sur la précision d'estimation des distances en RA. Ce levier étant utilisable dans notre contexte opérationnel, il est intéressant d'évaluer son impact sur le phénomène de sous-estimation rencontré dans la littérature. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser la méthode de présentation d'un feedback visuel final, comme dans l'étude de Mohler et al. (2006).

Enfin, compte tenu des résultats présentés dans la littérature (voir 3.4.1.4), nous avons choisi d'étudier la perception des distances selon la technique de correspondance perceptuelle (*perceptual matching*). Ce type de protocole semble fournir les meilleurs résultats quand à l'estimation subjective des distances.

Cette étude se décompose en deux expérimentations distinctes mais proches. La première a consisté à évaluer la perception d'objets réels et virtuels, l'objectif étant de comparer notre dispositif expérimental à une situation témoin (réel). La deuxième repose sur le même protocole mais intègre les deux facteurs principaux que nous cherchons à évaluer, à savoir la dominance oculaire et l'apprentissage. Ces deux études ont été effectuées dans le même environnement et avec le même matériel, mais les groupes de participants sont différents pour chaque expérimentation.

## 8.2.1 Expérimentation 1

### 8.2.1.1 *Rappel des objectifs et hypothèses*

L'objectif de cette expérimentation est de tester et, le cas échéant, de valider le protocole qui sera utilisé dans l'expérimentation 2. En effet, avant de pouvoir tirer toute conclusion sur l'effet de la dominance oculaire et du feedback sur la perception des distances en RA, il convient de s'assurer que notre dispositif expérimental permet bien de recueillir les distances perçues par les participants. Ainsi, il est nécessaire de vérifier si notre protocole permet de distinguer des différences dans les performances d'estimation qui soient uniquement liées aux variables indépendantes du protocole 2. Pour cela, nous souhaitons comparer notre condition expérimentale de référence (RA) à une situation témoin (réel).

De plus, comme expliqué dans l'introduction, nous cherchons aussi à vérifier le type de tendance suivi par les estimations. La littérature rapporte une tendance générale à la sous-estimation des distances ainsi qu'une dégradation croissante de l'estimation avec la distance et, d'autres, rapportent même un changement de tendance autour de 23m.

Par ailleurs, afin de s'assurer que l'action de déplacement de l'objet effectuée par le sujet n'introduit pas un biais dans le protocole (feedback indirect), nous avons choisi de contrôler cet aspect. Pour cela, nous avons introduit une nouvelle variable aléatoire, « position de départ », qui peut prendre deux valeurs : proche ou éloignée. Dans le premier cas, le point de départ de l'objet se situera au niveau du marqueur (soit 3m devant le participant et 5m avant la première distance cible), et dans le deuxième cas, l'objet apparaîtra à 38m du sujet, (soit 5m derrière la dernière distance cible). De plus, la vitesse de déplacement de l'objet virtuel est modifiée à chaque essai (tir aléatoire parmi cinq vitesses). De cette manière, le temps de déplacement de l'objet ne peut être un indice sur la distance, obligeant ainsi les participants à effectuer la tâche seulement par leur perception visuelle.

## 8.2.1.2 Méthode

### 8.2.1.2.1 Participants

Dix personnes (5 H, 5 F) ont participé bénévolement à cette expérimentation. Elles étaient âgées de 18 à 32 ans ( $M=23.9$ ) et avaient toutes une vue normale sans correction ou avec lentilles de contact. Aucune d'elles n'était familière du port de HMD ni de système de RA.

### 8.2.1.2.2 Matériel et tâche expérimentale

Les participants devaient effectuer une tâche de correspondance perceptuelle qui consiste à positionner un objet (soit réel, soit virtuel) jusqu'à une distance matérialisée par un repère réel. L'environnement de test est constitué d'un couloir dans lequel sont disposées cinq boîtes en carton rouges de dimension A3 portrait (297 mm x 420 mm). Chaque repère (boîte) est positionné à une des cinq distances cibles (8m, 15m, 23m, 28 m et 33m). Au début de chaque essai, l'expérimentateur indique au participant au niveau de quel repère il devra positionner l'objet. Ce dernier était assis sur une chaise à une extrémité du couloir, il déplaçait directement l'objet virtuel (condition RA) à l'aide d'une souris d'ordinateur, et déplaçait indirectement l'objet réel en indiquant à l'examinateur où le positionner (condition « réel »).

Quelle que soit la condition expérimentale, l'utilisateur perçoit l'environnement via l'utilisation d'un HMD Vuzix WRAP 920AR de type binoculaire VST présenté dans la figure suivante.



Figure 59 : Illustration du restituéur Vuzix WRAP 920AR utilisé durant l'expérimentation.

Malheureusement pour des raisons techniques, la restitution de la RA sur un seul écran n'était pas possible, par conséquent, un des deux écrans était masqué afin que le système puisse être utilisé en monoculaire (devant l'œil directeur des sujets). Ainsi, dans les deux conditions expérimentales (réel et RA), le champ de vision ainsi que la résolution de la scène perçue sont donc identiques car limités par les caractéristiques de ce restituéur. Le HMD permet l'acquisition vidéo de la scène réelle via une caméra ayant une résolution de 640x480 et la restitue sur les écrans en 1024x768.

Dans la condition RA, l'objet affiché est une chaise de couleur noire et de dimensions (40\*40\*80cm). Le système de RA employé s'appuie sur une technique de recalage par reconnaissance de pattern visuel (marqueur). Ici, il s'agit d'un marqueur plat carré de 80 cm de côté et est placé au sol, 3 m devant l'utilisateur. L'objet virtuel étant recalé dans l'environnement réel dans des dimensions spatiales identiques (1m virtuel équivaut à 1m réel), la distance le séparant du participant est donc connue et exprimée en mètres. Ainsi, pour chaque essai, le système enregistre la distance égocentrique finale (Distance placée).

Dans la condition réelle, le participant indique verbalement à L'expérimentateur le déplacement de l'objet à effectuer et dans ce cas, il s'agit d'une chaise de bureau classique. Lorsque le sujet juge la position satisfaisante, l'expérimentateur place une marque au sol qui permettra ultérieurement de mesurer la distance.

### 8.2.1.2.3 Déroulement

Il s'agit d'un protocole mixte (interindividuel et intra-individuel), où les sujets sont répartis dans deux groupes distincts. Les sujets du groupe 1 commencent en condition « Réel » puis effectue les 40 essais en condition « RA », et inversement pour le groupe 2 (RA puis Réel). Chaque sujet effectue toutes les conditions expérimentales. Les facteurs étudiés sont 1) la nature de l'objet à positionner (réel ou augmenté), 2) et la distance cible (8m, 15m, 23m, 28 m et 33m). Les données recueillies sont les positions finales de placement qui permettent d'obtenir la distance égocentrique entre l'utilisateur et l'objet (Distance placée). De plus, le *Miles test* a été utilisé pour déterminer l'œil dominant des participants, et donc choisir l'œil qui sera utilisé pour l'expérimentation. Les différentes variables étudiées sont résumées dans le tableau suivant :

<b>Variables indépendantes</b>		
Participants	10	Variable aléatoire
Groupe	2	1 (RA-Réel), 2 (Réel-RA)
Phase	2	1, 2
Distance cible	5	8m, 15m, 23m, 28m, 33m
répétition	8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
<b>Nombre d'essais par sujet</b>	<b>80</b>	
<b>Variables dépendantes</b>		
Distance placée	Mesurée en mètres	
Erreur signée	Distance cible – Distance placée, en mètres	
Erreur absolue	Distance cible – Distance placée  , en mètres	

Tableau 24 : Description des variables de l'expérimentation 1.

L'ordre des essais combinant distance, point de départ et répétition (40 essais) est le fruit d'un tri aléatoire informatique s'assurant qu'il n'y a pas deux tris identiques. Par conséquent, l'ordre des essais est différent pour chaque participant.

### 8.2.1.3 Résultats

Compte tenu du protocole expérimental, les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse de variance pour modèle mixte à mesures répétées (ANOVA *mixed design*), avec comme variable interindividuelle le groupe (1 ou 2) et comme variables intra-individuelles répétées la phase (1 ou 2), la distance (8, 15, 23, 28 ou 33) et la répétition (de 1 à 8). Les variables dépendantes utilisées ont été l'erreur signée ainsi que l'erreur absolue.

#### 8.2.1.3.1 Effet de la distance

Les résultats de l'ANOVA effectuée indiquent un effet significatif de la distance sur les erreurs absolues ( $F(4.224)=10.58, p<.001$ ) et la taille de l'effet est relativement importante (Cohen's  $f=0.38$ ). On constate une augmentation de l'erreur moyenne en fonction de la distance, ainsi qu'une augmentation de l'écart-type comme le montre la figure suivante.

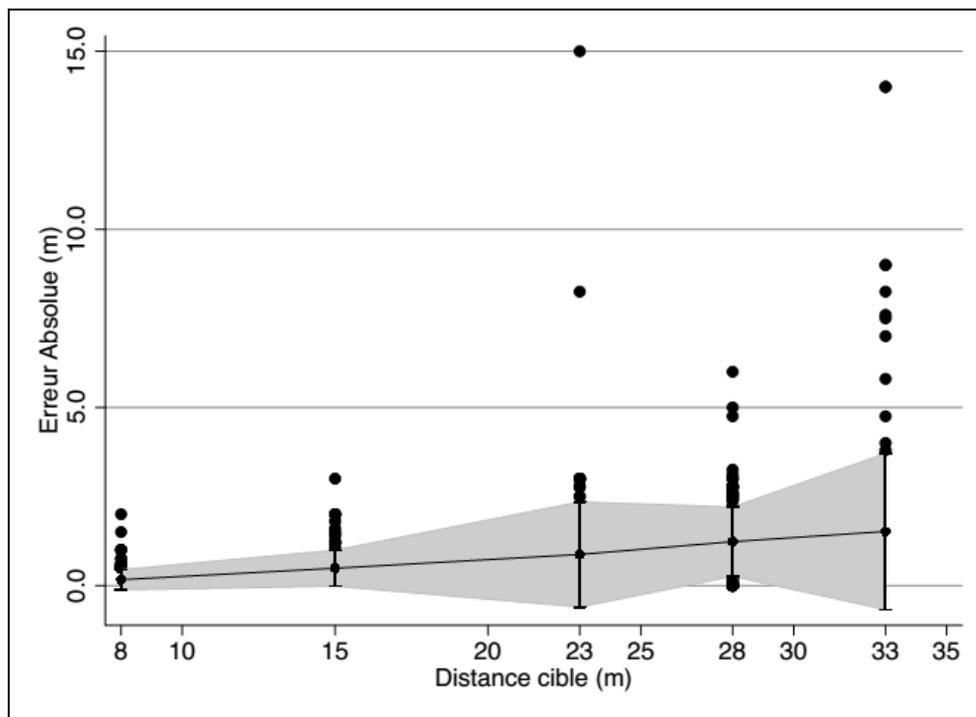


Figure 60 : Effet de la distance sur l'erreur absolue moyenne.

De plus, les tests de contraste indiquent des différences significatives entre la distance 8 et 15 ( $F(1.224)=11.24, p<.001$ ), entre 15 et 23 ( $F(1.224)=13.88, p<.001$ ) entre 23 et 28 ( $F(1.224)=12.89, p<.001$ ) et entre 28 et 33 ( $F(1.224)=30.38, p<.001$ ).

Enfin, lorsqu'on considère la distance comme une variable d'échelle, on observe une relation linéaire significative avec l'erreur absolue ( $F(1.224)=314.87, p<.001$ ).

### 8.2.1.3.2 Effet de la condition (réel vs RA)

Les résultats n'indiquent aucun autre effet principal, la variable Groupe ( $F(1.224)=0.60, p=.462$ ) ainsi que la variable phase ( $F(1.224)=2.06, p=.188$ ) ne présentent pas de différences significatives. Cependant, un effet d'interaction significatif est observé entre ces deux variables groupe et phase ( $F(1.224)=7.71, p=.024$ ) et une taille d'effet moyenne (Cohen's  $f=0.28$ ).

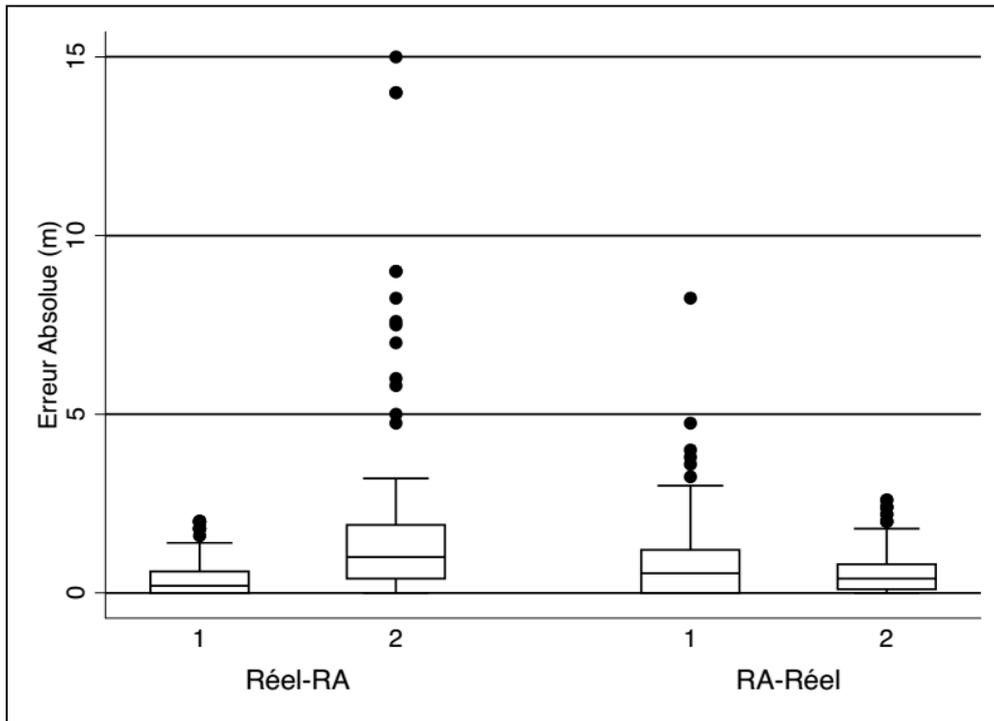


Figure 61 : Effet d'interaction entre le groupe et la phase sur l'erreur absolue.

Comme le montre la figure précédente, les phases en condition RA du groupe 1 et du groupe 2 obtiennent des erreurs absolues moyennes (resp.  $M=1.5, ET=2.2$  et  $M=0.9, ET= 1.1$ ) supérieures à celles des phases en condition réelle (resp.  $M=0.4, ET=0.5$  et  $M=0.6, ET= 0.6$ ).

Ces observations sont confirmées par les tests de contraste qui révèlent que la condition « Augmentée » est différente de la condition « Réel » ( $F(1.224)=204,28, p<.001$ ). Cet effet est illustré dans la figure suivante.

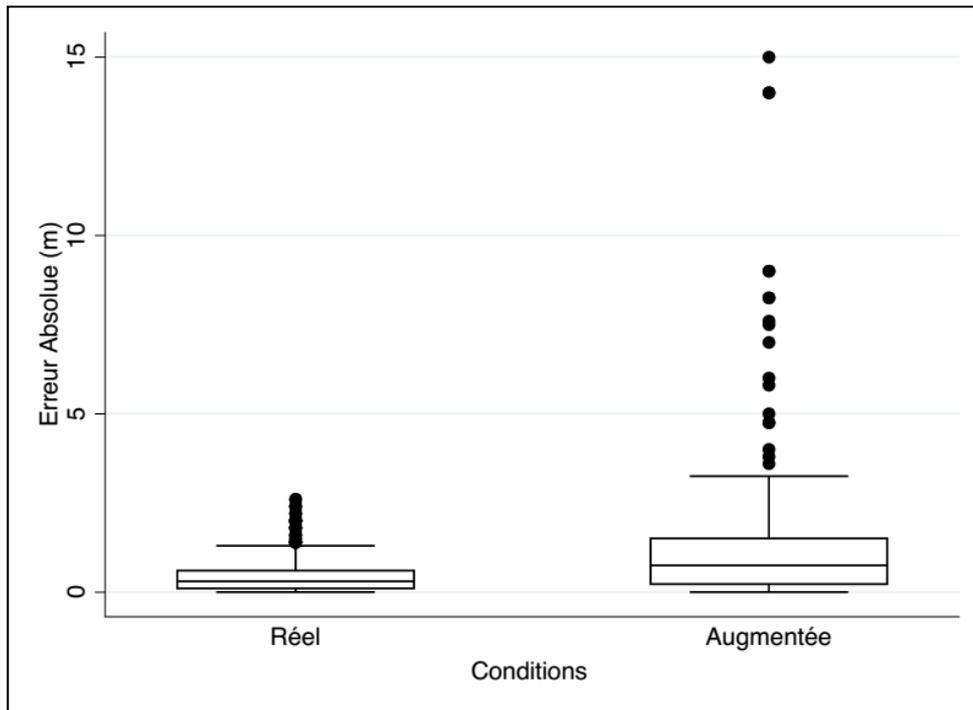


Figure 62 : Effet de la condition (réel VS RA) sur l'erreur absolue moyenne.

Par ailleurs, les tests post hoc révèlent aussi une différence significative ( $F(1.224)=188.58$ ,  $p<.001$ ) entre les résultats du groupe 1 phase 2 (RA) et ceux du groupe 2 phase 1 (RA). Ces résultats indiquent que les erreurs absolues moyennes en condition RA durant la phase 2 sont significativement plus importantes que durant la phase 1. Cependant, cet effet ne se retrouve pas dans la condition « réel » ( $F(1.224)=2.19$ ,  $p=.1406$ ).

Cela suggère un effet de la fatigue au cours de la durée du protocole provoquant une baisse des performances des sujets durant la deuxième phase. Cet effet s'applique uniquement à la condition RA qui semble être plus gourmande en ressources attentionnelles que la condition « réel ». Cet effet est illustré par la figure suivante, où l'on constate que l'erreur moyenne augmente plus avec la distance pour la phase 2 du groupe 1 que pour la phase 1 du groupe 2.

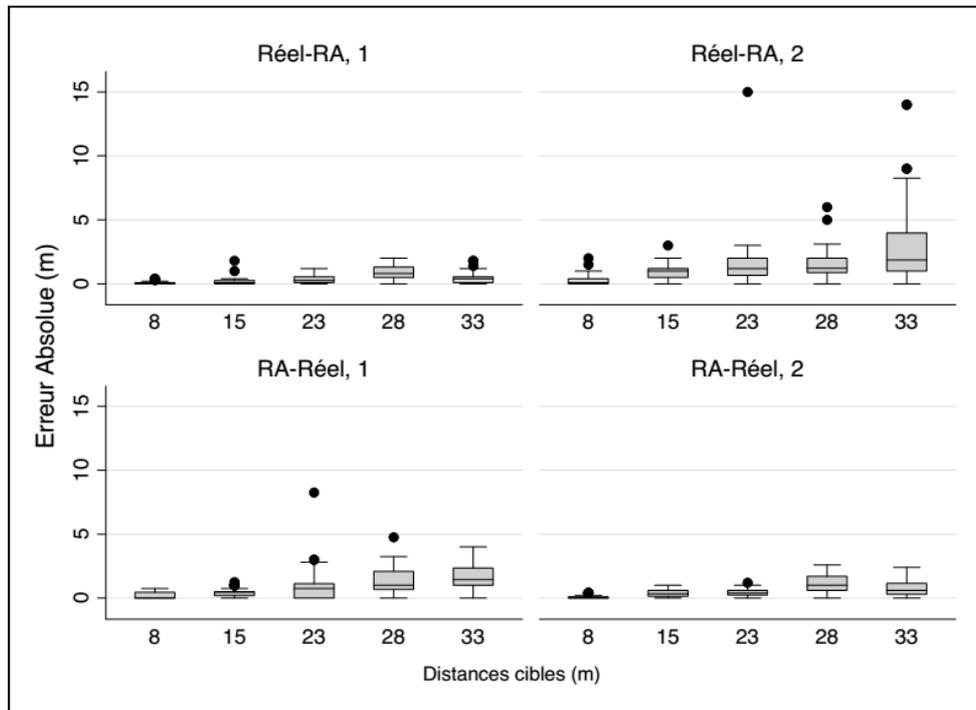


Figure 63 : Effet d'interaction entre la distance, la phase et le groupe.

Par ailleurs, les tests post-hoc révèlent un effet d'interaction significatif entre les facteurs groupe, phase et distance ( $F(4.224)=4.35$ ,  $p=0.0064$ ) qui traduit en partie l'effet de fatigue observé sur la condition RA mais aussi un effet d'interaction entre la condition (RA ou réel) et la distance.

#### 8.2.1.3.3 Effet d'interaction distance et condition (réel ou RA)

Hormis pour la distance « 8m », les erreurs absolues en condition RA sont significativement différentes de celles de la condition réel pour toutes les autres distances.

Distance	Réel	RA	df	F	P>F
8m	0.1	0.2	1	0.96	0.3272
15m	0.3	0.7	1	6.15	0.0139
23m	0.4	1.4	1	48.61	0.0000
28m	1.0	1.4	1	15.08	0.0001
33m	0.6	2.4	1	311.25	0.0000

Tableau 25 : Résultats des contrastes entre la condition réel et RA pour chaque distance.

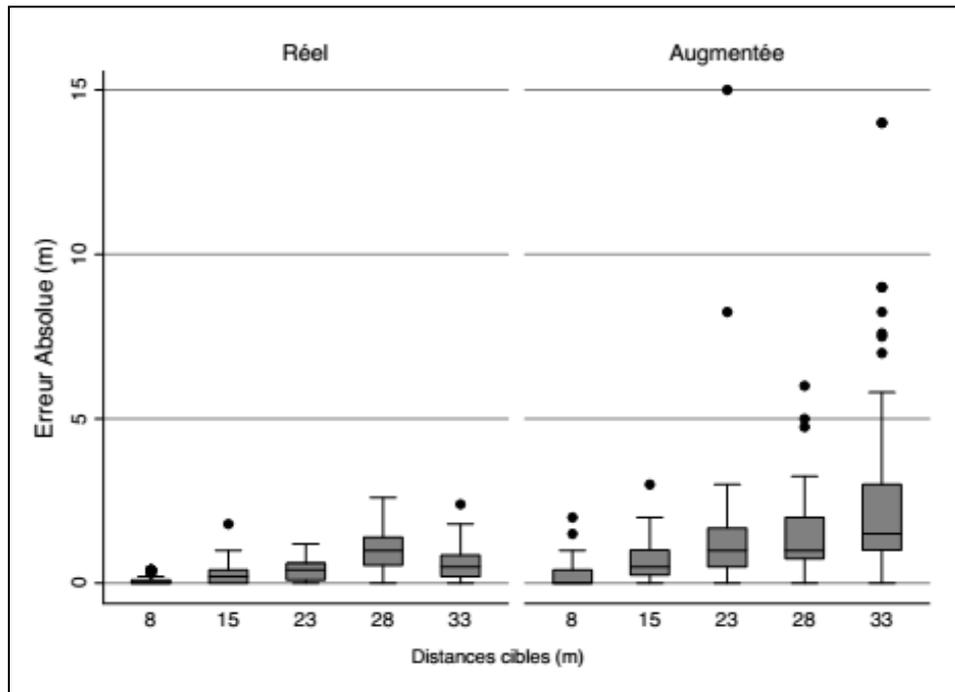


Figure 64 : Comparaison de l'erreur absolue en fonction de la condition et de la distance.

Ces différences sont illustrées dans la figure ci-dessus. On constate que l'erreur absolue est systématiquement supérieure en RA pour toutes les distances et augmente avec celle-ci.

#### **8.2.1.4 Discussion**

Cette première expérimentation a permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments quant à l'effet de la réalité augmentée sur la perception des distances. Tout d'abord, l'effet de la distance sur l'augmentation de l'erreur est cohérent de ce qui est observé dans la littérature et prouve que notre protocole permet de recueillir les distances perçues par les participants.

De plus, un effet significatif de la condition a été identifié indiquant que la perception des distances en condition RA dégrade les performances des sujets. Ici, aussi, ce constat est semblable à ce qui est décrit dans la littérature et valide une de nos hypothèses initiales. Cependant, nos résultats ne permettent pas de déterminer le type de tendance des erreurs, nous ne pouvons mettre en évidence ni de sous-estimation ni de surestimation constante durant les essais. De plus, les valeurs des erreurs commises en RA sont assez faibles (de 0.2m à 8m à 2.4m à 33m, soit de 2.5% à 7.3% d'erreur) comparativement à certaines études dans la littérature. Il semblerait donc que les indices de profondeur utilisés dans le protocole (taille relative, hauteur dans le champ visuel, taille familière et perspective de mouvement) ont permis de limiter le biais provoqué par la RA. Ce résultat est particulièrement intéressant dans la mesure où il indique que la perception précise des distances est possible en monoculaire et donc que la stéréoscopie n'est pas indispensable pour des applications à moyenne et longue distances.

Dans cette expérimentation, un restituteur de type video see-through a été utilisé dans les deux conditions (réel et RA). Les estimations des participants durant la condition « réel » sont plutôt précises (0.1m à 8m et 0.6 à 33m soit de 1.25% à 1.8% d'erreur) indiquant que ce n'est pas le restituteur lui-même qui induit les erreurs observées dans la condition RA.

## 8.2.2 Expérimentation 2

### 8.2.2.1 *Rappel des objectifs et hypothèses*

Comme indiqué dans l'introduction, nous nous intéressons ici à l'impact de la dominance oculaire et de la présentation d'un feedback visuel final sur les performances d'estimation des participants.

### 8.2.2.2 *Méthode*

#### 8.2.2.2.1 *Participants*

20 étudiants (12 H, 8 F) de l'université de Metz ont participé bénévolement à cette expérimentation et à l'instar de l'expérimentation 1, tous les sujets avaient une vue normale ou corrigée à normal avec des lentilles de contact. Ils étaient âgés de 19 à 31 ans ( $M=22.4$ ) et n'étaient pas familiers de l'usage de HMD ni de systèmes de RA. En outre, aucune des personnes ayant participé à l'expérimentation 1 n'a participé à cette deuxième évaluation.

#### 8.2.2.2.2 *Matériel et tâche expérimentale*

Le matériel et la tâche expérimentale sont identiques au protocole précédent, une des principales différences est, qu'ici, n'ayant pas de condition « réel », tous les essais seront effectués avec un objet augmenté (une chaise virtuelle) identique à la condition « RA » de l'expérimentation précédente. La deuxième différence majeure concerne le groupe « avec feedback », qui aura l'apparition du résultat de l'essai dans l'IHM de test lors de la validation du placement. Ce feedback se présentera sous forme textuelle en indiquant numériquement l'écart entre la distance placée par les sujets et la distance cible. Par exemple, si le participant positionne l'objet 3,5m avant la cible définie, le système affichera : « Erreur : -3.5 mètres. ».

#### 8.2.2.2.3 *Déroulement*

Comme dans l'expérimentation précédente, il s'agit ici aussi d'un protocole mixte (inter et intra-individuel) où les sujets sont répartis dans deux groupes de taille identique, l'un avec la condition « feedback » (Groupe 1), l'autre sans (groupe 2). De plus, l'ordre de passation des essais en condition « œil directeur » (OD) et « œil non directeur » (OnD) a été contrebalancé. Dans chaque groupe, la moitié des sujets commence en condition « OD » puis effectue les 40 essais en condition « OnD », et inversement pour l'autre moitié des participants (OnD puis OD). Cela constitue donc deux sous-groupes dans chacun des groupes principaux.

Enfin, l'ordre des essais combinant distance, point de départ et répétition (40 essais) est le fruit d'un tri aléatoire informatique s'assurant qu'il n'y a pas deux tris identiques.

### 8.2.2.3 Résultats

Compte tenu du protocole expérimental, les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse de variance pour modèle mixte à mesures répétées (ANOVA *mixed design*), avec comme variables interindividuelles le groupe (1 ou 2) et l'ordre (a et b), et avec comme variables intra-individuelles répétées la phase (1 ou 2), la distance (8, 15, 23, 28 ou 33) et la répétition (de 1 à 8). La variable dépendante utilisée a été l'erreur absolue. Des tests post-hoc ont été effectués dont des tests de contraste.

#### 8.2.2.3.1 Effet de la distance

Les résultats de l'ANOVA révèlent un effet principal significatif de la distance ( $F(4.1072)=74.36, p<.001$ ) et la taille de l'effet est importante (Cohen's  $f=0.62$ ). On constate une augmentation de l'erreur absolue moyenne en fonction de la distance, ainsi qu'une augmentation de l'écart-type comme le montre la figure suivante. Ce résultat est cohérent de ceux obtenus dans l'expérimentation précédente.

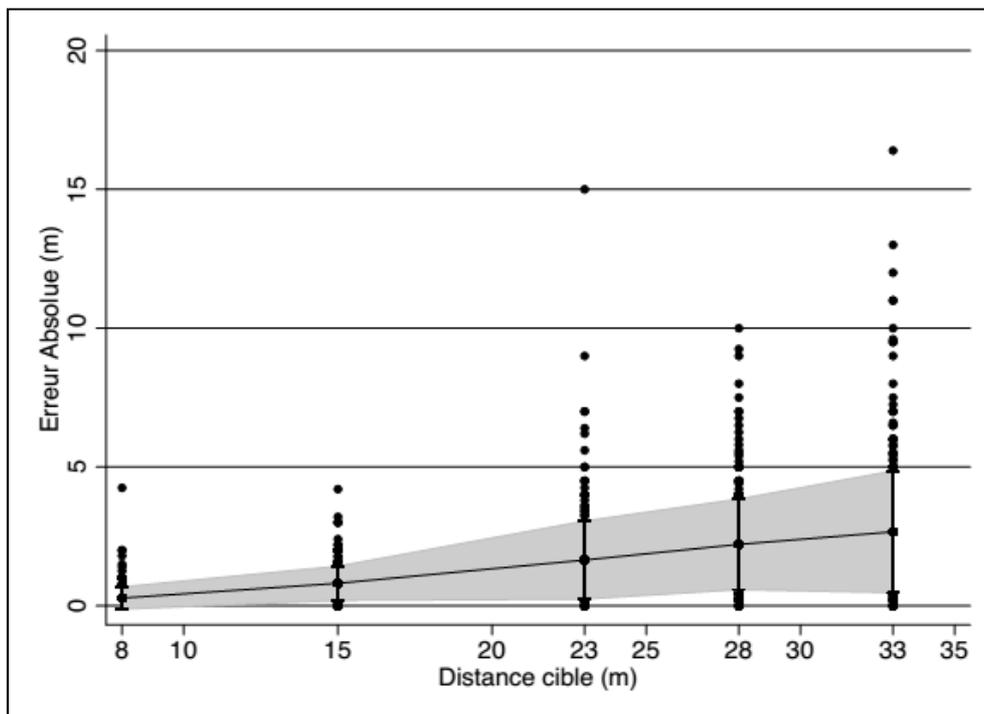


Figure 65 : Effet de la distance sur l'erreur absolue.

De plus, les tests de contraste indiquent des différences significatives entre la distance 8 et 15 ( $F(1.1072)=6.74, p=.0095$ ), entre 15 et 23 ( $F(1.1072)=24.69, p<.001$ ) et entre 28 et 33 ( $F(1.1072)=23.02, p<.001$ ). Cependant, il n'y a pas de différence significative entre 23 et 28 ( $F(1.1072)=2.37, p=0.1237$ ). Enfin, lorsqu'on considère la distance comme une variable d'échelle, on observe une relation linéaire significative avec l'erreur absolue ( $F(1.1072)=235.56, p<.001$ ).

#### 8.2.2.3.2 *Effet de la dominance oculaire*

L'effet de la dominance oculaire est exprimé dans ce protocole par l'interaction entre la variable groupe, ordre et phase. Contrairement à nos hypothèses initiales, les résultats ne montrent pas d'effet significatif de ce facteur sur les performances des sujets ( $F(1,1072)=1.55$ ,  $p=0.2304$ ). Par conséquent, le protocole ne permet pas de mettre en évidence un effet de la dominance oculaire sur cette tâche d'estimation des distances.

#### 8.2.2.3.3 *Effet direct du feedback visuel final*

L'effet du feedback visuel final est exprimé dans le protocole par la variable « groupe ». Cependant, contrairement à nos hypothèses de départ, la présentation de ce dernier ne semble pas apporter un gain significatif sur les performances des participants. En effet, les résultats de l'ANOVA n'indiquent aucun effet significatif du groupe ( $F(1,1072)=3.45$ ,  $p=0.0819$ ).

### 8.2.2.4 **Discussion et limites**

#### 8.2.2.4.1 *La dominance oculaire*

Les résultats de cette expérimentation, bien que ne permettant pas de confirmer nos hypothèses initiales, sont particulièrement intéressants. A notre connaissance, cette étude est la première à s'intéresser à l'impact de la dominance oculaire sur la perception des distances en RA, il est donc difficile de la comparer à d'autres résultats. Cette étude ne montre pas de différence significative entre l'œil directeur et l'autre œil. L'absence d'effet de la dominance peut potentiellement s'expliquer de deux manières différentes et opposées:

- La dominance oculaire n'a aucun effet sur la perception des distances. Il y aurait donc une équivalence fonctionnelle des deux yeux sur ce type de processus.
- La dominance oculaire a un effet sur la perception des distances, mais un paramètre de notre condition expérimentale a empêché cet effet de se produire.

Le premier cas nécessiterait d'avantages d'études sur cet aspect. Si d'autres études complémentaires confortaient ce résultat, cela impliquerait que l'on peut donc positionner le restituteur devant l'œil de notre choix sans impacter les performances d'estimation des distances.

Dans le deuxième cas, il convient d'identifier quel aspect de notre condition expérimentale n'a pas permis de mettre en évidence cet effet. Une première hypothèse consisterait à s'interroger sur la notion même de dominance oculaire. En effet, ce phénomène neurocognitif permet à notre système visuel de faciliter la gestion et l'intégration de deux images différentes simultanément. Cependant, le restituteur employé dans le cadre de cette expérimentation ne permettait pas d'afficher la RA seulement d'un côté.

Par conséquent, cela imposait de masquer l'œil non testé. Dans cette situation de vision monoculaire, notre système perceptif ne reçoit qu'une seule source d'informations visuelles, il n'y a donc pas de risque de conflit entre les deux yeux. Il est possible que dans ce contexte, le phénomène de dominance n'étant pas nécessaire, qu'il n'y ait aucune différence fonctionnelle entre les deux yeux.

Afin de tester cette hypothèse, il serait intéressant de reproduire cette expérimentation en utilisant un restitué permettant d'afficher l'environnement réel en stéréoscopie et la RA seulement devant un seul œil. Ainsi, la nécessité de dominance oculaire serait préservée tout en permettant de tester indépendamment chaque œil sur la tâche d'estimation des distances.

Une deuxième explication possible de l'absence d'effet serait que la dominance oculaire, tout comme la disparité binoculaire, n'aurait un effet prépondérant sur la perception de la profondeur essentiellement qu'à courte distance (Cutting, 1995). Dans notre expérimentation, les cibles sont placées entre 8m et 33m, ce qui correspond à l'espace intermédiaire et au début de l'espace lointain dans la classification de Cutting. A l'instar des indices binoculaires, il est possible que dans ce contexte, l'effet des indices monoculaires soit plus important que celui de la dominance oculaire. Par conséquent, les indices de profondeur utilisés dans le protocole auraient donc masqué ou compensé les différences de performances entre l'œil directeur et l'autre.

Il serait intéressant, pour vérifier cette hypothèse, de reproduire ce protocole mais à courte distance (moins de 3m). Ainsi, la sensibilité de l'écart entre les deux yeux serait potentiellement suffisante pour mettre en évidence un quelconque effet de la dominance oculaire.

#### 8.2.2.4.2 *Effet du feedback visuel final*

Le choix d'utiliser un feedback dans notre protocole a été motivé par les résultats de l'étude de Mohler et al. (2006). Mais contrairement à cette expérimentation, nous n'obtenons pas d'effet significatif de la présentation du feedback sur les performances d'estimation des distances. Afin d'analyser les causes de cet écart entre nos résultats, il convient d'identifier les différences expérimentales qui ont pu influencer les performances des participants.

Tout d'abord, une des principales différences entre ces deux études est la nature de l'environnement. Dans celle de Mohler, l'expérimentation s'est déroulée en réalité virtuelle et non en réalité augmentée comme dans notre situation. Cette première distinction est importante dans la mesure où, comme l'indique la revue de la littérature (voir section 0), les erreurs d'estimation des distances sont beaucoup moins importantes en RA qu'en RV. Par conséquent, il est possible que l'effet de l'apprentissage par présentation d'un feedback soit plus prononcé en RV, là, où les erreurs sans apprentissage sont très importantes.

Par ailleurs, les auteurs de cette étude n'ont pas utilisé les mêmes méthodes d'estimation des distances que dans la nôtre. En effet, ils ont appliqué les techniques d'estimation verbale et de *Blind walking* et non la technique de correspondance perceptuelle utilisée dans notre expérimentation. Cette seconde distinction peut aussi en partie expliquer les différences de résultats obtenus. Comme l'indique la revue de la littérature sur les techniques d'estimation des distances (voir section 3.4.1.4), l'approche employée dans notre étude fournit les meilleures performances. Ce choix de méthode a donc potentiellement aussi participé à réduire les erreurs d'estimation recueillies. De plus, cette différence de méthode introduit un autre aspect ayant pu participer aux écarts de résultats constatés. Dans notre protocole, les participants devaient déplacer un objet virtuel pour estimer les distances, contrairement à l'étude de Mohler et al. Le fait d'afficher un objet a permis d'introduire des indices de profondeur (taille relative et taille familière) qui n'étaient donc pas disponibles dans leur étude. Ce nombre d'indices de profondeur plus important a aussi pu permettre aux participants d'estimer plus précisément les distances et donc de réduire les erreurs. Autrement dit, les erreurs étant moins importantes dans notre étude comparativement à celle de Mohler, il est possible que l'effet de l'apprentissage soit suffisamment moins important pour ne pas être détecté par les tests statistiques que nous avons effectués.

Pour tester cette hypothèse, le plus simple serait de reproduire ce protocole en y intégrant les deux principales techniques d'estimation des distances (correspondance perceptuelle et *Blind walking*). Ainsi, cela permettrait de vérifier si l'absence d'effet de l'apprentissage constatée est bien due à la technique employée. Une autre solution serait de complexifier la tâche expérimentale en supprimant progressivement certains indices de profondeur afin de réduire l'effet plafond des erreurs. De plus, Cela permettrait de comparer l'efficacité des différents indices utilisés ici sur les performances d'estimation des distances.



# **Conclusion générale**



## 9. CONCLUSIONS ET APPORTS DE LA THÈSE

---

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse concernent la conception et l'évaluation de systèmes de réalité augmentée (RA) pour le fantassin. Plus précisément, ces travaux abordent cette thématique sous l'angle de l'ergonomie et cherchent à dresser les problématiques spécifiques de ce type de système. L'approche adoptée s'appuie sur l'élaboration d'un cadre d'analyse pour la RA, permettant de classer les différents types de système ainsi que les avantages et inconvénients intrinsèques à chaque catégorie selon différents critères. La démarche décrite ici se traduit par l'application de ce *framework* lors des phases de conception et d'évaluation d'un système de RA dans le cadre d'un projet industriel.

### 9.1 SYNTHÈSE DES CONTRIBUTIONS CONCEPTUELLES

La première partie de ce mémoire présente une revue bibliographique composée de deux chapitres.

Le chapitre 2 présente un tour d'horizon des applications, technologies et définitions de la réalité augmentée. Il en ressort que la RA est un paradigme d'interaction reposant sur une variété importante de technologies différentes. Il peut être mis en œuvre de façon très diverse selon le contexte d'application. Le caractère polymorphe de la RA induit une difficulté à fournir une définition formelle et partagée de ce concept car il ne peut être réduit qu'à une simple technologie émergente.

Le chapitre 3 s'intéresse aux études ergonomiques publiées dans le domaine de la RA. Le premier constat est qu'il n'y a que très peu d'études centrées utilisateurs dans le domaine comparativement aux travaux techno-centrés. Cela s'explique en partie par le caractère novateur de ce concept et par la faible maturité technologique de certains de ses constituants. Cependant, le nombre d'études avec tests utilisateurs est en progression au cours de ces dernières années et notamment grâce aux avancées techniques récentes.

Le deuxième constat de ce chapitre est qu'il y a bien des problématiques ergonomiques spécifiques qui sont abordées lors de l'évaluation de tels systèmes.

Cette première partie met en évidence le besoin de clarifier la notion de réalité augmentée et de fournir un cadre d'analyse adapté permettant la prise en compte des spécificités de ce type d'interface homme-machine.

La deuxième partie de ce mémoire présente l'élaboration et l'application d'un cadre d'analyse contenant une définition, une taxonomie et une grille de critères d'évaluation adaptés aux systèmes de RA.

Le chapitre 5 décrit les différents axes de la classification WOTSH&R (**W**orld, **O**bject, **T**ag, **S**urround, **H**ead, **E**nvironnement & **E**léments virtuels, **R**estituteur) ainsi que la grille de critères appliquée à la comparaison théorique des différentes catégories de restitués de RA dans le cadre d'un premier projet industriel. Les premiers résultats indiquent que le *framework* est suffisamment sensible pour discriminer les différents types de systèmes de RA possibles et permet d'orienter les choix de conception initiaux sur la base des avantages et inconvénients identifiés. Cependant, ce chapitre montre aussi qu'il est nécessaire de pratiquer des études empiriques avec utilisateurs pour évaluer de façon optimale les systèmes de RA car les caractéristiques propres de chaque système peuvent influencer fortement l'expérience utilisateur.

Le chapitre 6 présente différentes études empiriques qui ont été effectuées dans le cadre d'un projet industriel. Le *framework* proposé ici a permis d'orienter les problématiques à évaluer durant ces différents travaux. Les résultats successifs de ces études alimentent en retour le *framework* en fournissant des retours d'expériences sur les avantages et inconvénients des catégories des systèmes étudiés. De plus, ces études ont permis d'identifier des problématiques ergonomiques majeures de la RA (tunnel cognitif et perception des distances) qui se révèlent être critiques dans notre domaine d'application.

Par ailleurs, le Chapitre 7 présente l'application de ce *framework* non pas à l'évaluation d'un système existant mais à la conception de nouveaux démonstrateurs de RA. La taxonomie WOTSH&R permet de classer les systèmes existants mais permet aussi d'identifier des catégories de systèmes potentiellement innovants. Ce chapitre décrit deux preuves de concept d'interface de RA qui ont été élaborées grâce à cette taxonomie.

La troisième et dernière partie de ce mémoire présente les travaux réalisés sur la problématique de la perception des distances en RA. Comme identifié lors des études exploratoires et de la revue bibliographique, il y a un problème récurrent de sous-estimation des distances en RA et RV. Ce phénomène ayant potentiellement des conséquences critiques dans notre domaine d'application, une partie importante des travaux de cette thèse a été dédiée à l'étude de cette problématique.

La section 3.4 de la revue bibliographique présente une synthèse des études réalisées dans la littérature. Il s'avère que cette problématique est bien connue de la communauté scientifique et qu'elle apparaît de façon récurrente dans de nombreuses études. Même si les causes précises de ce phénomène ne sont pas encore clairement identifiées, plusieurs pistes pour réduire cet effet ont été identifiées. Les solutions applicables dans notre contexte ont été sélectionnées et évaluées au travers d'études expérimentales présentées dans le chapitre 8.

La première étude s'intéresse à la prise en compte des indices de profondeur lors de la conception des IHM de RA pour évaluer si la représentation graphique des éléments virtuels peut influencer la précision d'estimation de leurs distances. Ces travaux ont été réalisés sur le système SCIV afin de fournir des solutions à court terme. Cinq modes de représentation des entités tactiques ont été comparés dans cette expérimentation afin d'identifier celle fournissant les meilleures performances. Les résultats indiquent que les indices de profondeur intégrés lors de la conception graphique facilitent l'estimation des distances et permettent de réduire de façon importante les erreurs constatées dans l'étude exploratoire.

La deuxième étude s'intéresse à l'effet de la dominance oculaire et à l'effet de l'apprentissage via la présentation d'un feedback sur l'estimation des distances. La première problématique n'ayant jamais été traitée dans la littérature, cette étude constitue un apport original. Les résultats obtenus n'indiquent pas d'effet significatif de la dominance oculaire ni du feedback sur les performances des sujets. Cela s'explique notamment par l'efficacité des indices de profondeur utilisés dans ce protocole qui ont limité le phénomène de sous-estimation constaté précédemment.

## **9.2 SYNTHÈSE DES CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES**

Les travaux de cette thèse ayant été effectués essentiellement en milieu industriel, ils ont notamment permis d'apporter quatre contributions principales à l'entreprise.

Tout d'abord, les travaux de recherche menés durant ces années de thèse et notamment les revues bibliographiques ont permis d'effectuer de la veille technologique et concurrentielle sur le domaine de la réalité augmentée, d'un point de vue technique mais aussi ergonomique. La capitalisation et la mise à jour de ces connaissances permet à l'entreprise de connaître l'état de l'art de ce domaine prometteur.

Le deuxième apport concerne les études exploratoires menées dans le cadre du projet Sagem-DGA. Même si les contraintes industrielles et techniques n'ont permis d'appliquer toutes les recommandations ergonomiques produites, ces travaux ont permis d'assurer un accompagnement ergonomique tout au long du processus de conception du système et jusqu'aux réunions avec le client étatique.

Le troisième apport concerne directement le *framework* élaboré durant ces travaux de thèse. Il fournit à l'entreprise un outil d'aide à la conception et à l'évaluation ergonomique de systèmes de RA dont une première application en milieu industriel a été effectuée. Que se soit dans l'étude RA du projet Sagem-DGA ou durant les expérimentations effectuées sur le SCIV, cette méthodologie a contribué directement aux projets de l'entreprise. Et comme tout outil, son efficacité pourra être améliorée au cours du temps.

Enfin, dernier apport industriel, ces travaux de thèse ont inspiré la conception de nouveaux systèmes de RA. Cela a débouché sur le développement de plusieurs concepts d'interface pour le fantassin dont les deux démonstrateurs présentés dans le Chapitre 7. Ces derniers s'inscrivent parfaitement dans la démarche d'innovation de Sagem et ont d'ailleurs été présentés à de nombreuses reprises lors de présentations R&D internes. Ces prototypes n'ont qu'une faible maturité technologique et sont encore loin d'être des produits commercialisables, mais ils permettent d'illustrer les applications potentielles de la RA que l'entreprise pourrait industrialiser dans le futur.

En résumé, les travaux de cette thèse ont pu fournir des apports à courts et moyens termes à l'entreprise et explorer des axes de recherches scientifiques dont certains encore ouverts, sont précisés dans la section suivante.

## 10. PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS

---

En conclusion de ce document, nous présentons quelques perspectives envisagées pour poursuivre les travaux initiés durant cette thèse.

### 10.1 PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

- Poursuivre l'étude des différentes problématiques ergonomiques spécifiques identifiées mais non traitées. Par exemple, dans le contexte d'un système de type W pour le fantassin, la problématique de tunnel cognitif est un axe prioritaire à traiter. A l'instar de la mauvaise perception des distances, les conséquences de cet effet peuvent être critiques dans ce type de contexte d'usage.

- Poursuivre les travaux sur la perception des distances et notamment en situation de conflit avec l'indice de profondeur majoritaire, l'occlusion. Ces situations sont susceptibles d'apparaître très fréquemment dans le contexte du fantassin à cause du masquage naturel présent dans l'environnement opérationnel (relief, végétation, bâtiments, etc.). Ces situations de vision à rayon X (*Xray vision*) sont devenues une problématique à part entière pour certains chercheurs de la communauté (Avery, Sandor, & Thomas, 2009; Livingston, MarkA, Dey, Sandor, & Thomas, 2013).

### 10.2 PERSPECTIVES LIEES A LA TAXONOMIE WOTSH&R

- Poursuivre la validation de ce framework et notamment les axes non encore évalués, c'est à dire l'axe « type d'élément virtuel » et l'axe « type d'environnement d'usage ». L'étude de ces deux dimensions pourra certainement aussi révéler de nouvelles problématiques ergonomiques spécifiques à la RA, comme des propriétés ergonomiques différentes selon le niveau d'intégration. De même, la grille de critère d'évaluation pourrait aussi être enrichie afin de s'adapter au mieux aux différents contextes d'usage.

- Poursuivre les évaluations empiriques de systèmes de RA pour enrichir son pouvoir prédictif. En effet, plus le nombre d'études sera important, et donc plus les retours d'expérience seront nombreux, plus les avantages et inconvénients de chaque catégorie de systèmes seront clairement identifiés.

- Développer un outil logiciel interactif (base de données, wiki, site web, application Smartphone/Tablet, etc.) permettant d'extraire rapidement les avantages et inconvénients théoriques d'un système précis ou d'identifier facilement les problématiques à prendre en compte lors de l'évaluation et de la conception d'un système donné.

### 10.3 PERSPECTIVES INDUSTRIELLES

- Poursuivre les travaux sur la RA pour le fantassin et notamment la conception et le développement d'une technique de recalage pertinente et efficace. Les contraintes de masse, d'autonomie énergétique, la forte mobilité de l'utilisateur, l'incapacité de préparer l'environnement réel, la précision de recalage et la fiabilité de positionnement attendue font que ce contexte d'usage de la RA est certainement le plus exigeant d'un point de vue technique. Les solutions actuellement disponibles ne sont pas suffisantes pour être réellement déployées dans cet environnement. De même, la conception d'un restitué performant et adapté à un usage militaire réel est également nécessaire. Il n'existe pas, à notre connaissance, de restitué de type HMD suffisamment performant, robuste et confortable pour une utilisation réelle.
- Evaluer l'utilité et l'utilisabilité des démonstrateurs proposés dans cette thèse via des expérimentations empiriques avec des utilisateurs. Les gains potentiels pressentis dans cette thèse ne pourront être atteints que par une amélioration de l'ergonomie de ces IHM et par l'intégration d'une technique de recalage pertinente.
- Enfin, il serait particulièrement intéressant de continuer à concevoir d'autres types de systèmes de RA identifiés par la taxonomie mais n'existant pas encore. Ainsi, ces systèmes innovants permettront certainement de satisfaire de nouveaux contextes d'applications où les produits actuels ne sont pas adaptés et pourraient ainsi ouvrir à l'entreprise de nouveaux marchés.

# Bibliographie

- Albrecht, R., Lokki, T., & Savioja, L. (2011). *A mobile augmented reality audio system with binaural microphones*. Communication présentée à Proceedings of Interacting with Sound Workshop: Exploring Context-Aware, Local and Social Audio Applications, Stockholm, Sweden.
- Anastassova, M., Mégard, C., Burkhardt, J.-M., & Breda, J. (2006). Evaluation ergonomique d'un prototype de réalité augmentée par des tests utilisateurs : apports et difficultés. Dans E. Brangier, C. Kolski & J.-R. Ruault (Édit.), *Ergo-IA'2006 (Bidart, 11-13 Octobre)* (p. 45-53).
- Aragon, C. R. (2004, 24-28 Oct. 2004). *Usability evaluation of a flight-deck airflow hazard visualization system*. Communication présentée à Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04. The 23rd (vol. 1, p. 4.B.2-41-11 Vol.41). doi: 10.1109/dasc.2004.1391315
- Avery, B., Piekarski, W., Warren, J., & Thomas, B. H. (2006). Evaluation of user satisfaction and learnability for outdoor augmented reality. Dans W. Piekarski (Édit.), *Conferences in research and practice in information technology (CRPIT). Seventh Australasian User Interface Conference (AUIC2006)*.
- Avery, B., Sandor, C., & Thomas, B. H. (2009). *Improving Spatial Perception for Augmented Reality X-Ray Vision*. Communication présentée à IEEE Virtual Reality 2009.
- Azémar, G., Stein, J. F., & Ripoll, H. (2008). Effets de la dominance oculaire sur la coordination œil-main dans les duels sportifs. *Science & Sports*, 23(6), 263-277. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2008.06.004>
- Azuma, R. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence*, 6 355-385. doi: citeulike-article-id:3075409
- Azuma, R., & Bishop, G. (1994). *Improving static and dynamic registration in an optical see-through HMD*. Communication présentée à Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques.
- Azuma, R. T., Barfield, W., & Caudell, T. (2001). Augmented reality: Approaches and technical challenges. Dans *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*. (p. 27-63). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Bai, Z., & Blackwell, A. F. (2012). Analytic review of usability evaluation in ISMAR. *Interacting with Computers*, 24(6), 450-460. doi: 10.1016/j.intcom.2012.07.004
- Bayart, B. (2007). *Réalité augmentée haptique : théorie et applications*. (Université d'Évry-Val d'Essonne).
- Bederson, B. B. (1995). *Audio augmented reality: a prototype automated tour guide*. Communication présentée à Conference Companion on Human Factors in Computing Systems, Denver, Colorado, USA.
- Billinghurst, M., Bee, S., Bowskill, J., & Kato, H. (1999). Asymmetries in collaborative wearable interfaces. Dans *Proceedings of the International Symposium on Wearable Computer (ISWC)* (p. 133-140).
- broadbent, D. E. (1958). The general nature of vigilance. Dans *Perception and communication* (p. 108-139). Elmsford, NY, US: Pergamon Press.

- Caldwell, J. L., Cornum, R. L. S., Stephens, R. L., & Rash, C. E. (1990). *Visual processing: implications for helmet-mounted displays* (vol. 1290, p. 165-172). Tiré de <http://dx.doi.org/10.1117/12.20963>
- Calhoun, G. L., Draper, M. H., Abernathy, M. F., Delgado, F., & Patzek, M. (2005). Synthetic vision system for improving unmanned aerial vehicle operator situation awareness. Dans *Enhanced and Synthetic Vision 2005. Proc. SPIE Vol. 5802* (p. 219-230).
- Caudell, T., & Mizell, D. W. (1992, 7-10 Jan). *Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes* Communication présentée à Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, Kauai, HI (vol. 2, p. 659 - 669 vol.652).
- Claverie, B., & leger, A. (2009). Vision augmentée par HUD : pour une prise en compte des contraintes psychophysiologiques *Journal of Human Mediated Interactions*, 10(1).
- Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A., & Thompson, W. B. (2003). The Influence of Restricted Viewing Conditions on Egocentric Distance Perception: Implications for Real and Virtual Environments.
- Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 29(1), 29-36.
- Cutting, J. E. (2003). Reconceiving Perceptual Space. Dans H. Hecht, M. Atherton & R. Schwartz (Édit.), *Perceiving pictures: An interdisciplinary approach to pictorial space*: MIT press.
- Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. Dans W. E. S. Rogers (Édit.), *Handbook of perception and cognition, Vol 5; Perception of space and motion* (vol. 5, p. 69-117). San Diego: Academic Press.
- Damala, A., Cubaud, P., Bationo, A., Houlier, P., & Marchal, I. (2008). Bridging the Gap between the Digital and the Physical: Design and Evaluation of a Mobile Augmented Reality Guide for the Museum Visit.
- Dubois, E., Nigay, L., & Troccaz, J. (2001). Consistency in augmented reality systems. Dans M. Reed Little & L. Nigay (Édit.), *EHCI 2001* (p. 111-122). Berlin: Springer-Verlag.
- Dünser, A., Grasset, R., & Billinghurst, M. (2008). A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. Dans *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses*. New York: ACM.
- Ellis, S. R., & Bucher, U. J. (1994). *Distance Perception of Stereoscopically Presented Virtual Objects Optically Superimposed on Physical Objects by a Head-Mounted See-Through Display*. Communication présentée à Human Factors and Ergonomics Society Tiré de <http://pro.sagepub.com/content/38/19/1300>
- Ellis, S. R., Menges, B. M., Barfield, W., & Caudell, T. (1998). Studies of the localization of virtual objects in the near visual field. *Human Factors* 415-431. Tiré de

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=psyh&AN=2001-16260-008&lang=fr&site=ehost-live>

- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems: Situation awareness. *Human Factors*, 37(1), 32-64. doi: citeulike-article-id:1222691
- Feiner, S., MacIntyre, B., Haupt, M., & Solomon, E. (1993). *Windows on the world: 2D windows for 3D augmented reality*. Communication présentée à Proceedings of the 6th annual ACM symposium on User interface software and technology, Atlanta, Georgia, USA.
- Foyle, D. C., McCann, R. S., Sanford, B. D., & Schwirzke, M. F. J. (1993). Attentional Effects with Superimposed Symbology: Implications for Head-up Displays (HUD). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 37(19), 1340-1344. doi: 10.1518/107118193784162227
- Fuchs, P., Hugues, O., & Nannipieri, O. (2010). *Proposition d'une Taxonomie Fonctionnelle des Environnements de Réalité Augmentée*. l'Association Française de Réalité Virtuelle et de l'Interaction 3D AFRV2010, Orsay.
- Fulbrook, J. E., Ruffner, J. W., & Labbe, R. (2008). *An Augmented Reality Binocular System (ARBS) for air traffic controllers*. Communication présentée à Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Orlando, FL (vol. 6955). Tiré de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-44349156477&partnerID=40&md5=1382b3c130da83088b15c3f2fba4e39b>
- Gabbard, J. L., Swan, J. E., II, Hix, D., Kim, S.-J., & Fitch, G. (2007). Active Text Drawing Styles for Outdoor Augmented Reality: A User-Based Study and Design Implications. Dans *IEEE Virtual Reality Conference (Charlotte, North Carolina)* (p. 35-42): IEEE.
- Jerome, C. J., & Witmer, B. G. (2008). *The perception and estimation of egocentric distance in real and augmented reality environments*: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Jones, A., Edward Swann II, J., Singh, G., Kolstad, E., & Ellis, S. R. (2008). The effects of virtual reality, augmented reality, and motion parallax on egocentric depth perception. Dans *Proceedings of the APGV 2008 Conference* (p. 9-14). New York: ACM.
- Jones, A., Swan II, J. E., Singh, G., & Ellis, S. (2011). *Peripheral Visual Information and Its Effect on the Perception of Egocentric Depth in Virtual and Augmented Environments*. Communication présentée à ACM SIGGRAPH Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV) 2011, pages 29–35.
- Jones, A., Swan II, J. E., Singh, G., Franck, J., & Ellis, S. R. (2009). *The Effects of Continued Exposure to Medium Field Augmented and Virtual Reality on the Perception of Egocentric Depth*. Communication présentée à APGV 2009.
- Julier, S., Baillot, Y., Lanzagorta, M., Brown, D., & Rosenblum, L. (2000). BARS: Battlefield Augmented Reality System. Dans *NATO Symposium*

- on Information Processing Techniques for Military Systems (Istanbul, Turkey, October 2000).
- Jurgens, V., Cockburn, A., & Billinghamurst, M. (2006). Depth cues for augmented reality stakeout. Dans *CHINZ 2006* (p. 117-124). New York: ACM.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Kirkley, S. E. H., Jr. (2003). *Augmented reality performance assessment battery (ARPAB): Object recognition, distance estimation and size estimation using optical see-through head-worn displays*. (ProQuest Information & Learning, US). Tiré de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=psyh&AN=2003-95024-185&lang=fr&site=ehost-live>
- Knapp, J. M., & Loomis, J. M. (2004). Limited Field of View of Head-Mounted Displays Is Not the Cause of Distance Underestimation in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments, VOLUME 13, NUMBER 5*.
- Knecht, M., Dünser, A., Traxler, C., Wimmer, M., & Grasset, R. (2011). A Framework for Perceptual Studies in Photorealistic Augmented Reality.
- Kron, A., & Schmidt, G. (2005). *Haptic telepresent control technology applied to disposal of explosive ordnances: Principles and experimental results*. Communication présentée à IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Dubrovnik (vol. IV, p. 1505-1510). Tiré de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33748367458&partnerID=40&md5=ea66e7bff73c5eaa79f004370f63cce7>
- Kruijff, E., Swan li, J. E., & Feiner, S. (2010). Perceptual Issues in Augmented Reality Revisited.
- LaFleur, T., Draper, M. H., & Ruff, H. A. (2001). *Evaluation of eye-dominance effects on target-acquisition tasks using a head-coupled monoculare HMD*. Communication présentée à Human Factors and ergonomics society.
- Levy, J. L., Foyle, D. C., & McCann, R. S. (1998). *Performance benefits with scene-linked HU symbology: An attentional phenomenon ?* Communication présentée à Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomic Society, Santa Monica, CA: HFES.
- Livingston, M., Dey, A., Sandor, C., & Thomas, B. (2013). Pursuit of “X-Ray Vision” for Augmented Reality. Dans W. Huang, L. Alem & M. A. Livingston (Édit.), *Human Factors in Augmented Reality Environments* (p. 67-107): Springer New York.
- Livingston, M., Swan li, J. E., Ai, Z., & Smallman, H. S. (2009). *Indoor vs. Outdoor Depth Perception for Mobile Augmented Reality*. Communication présentée à IEEE Virtual Reality, Lafayette, Louisiana, USA.
- Livingston, M., Swan li, J. E., Gabbard, J. L., & hollerer, T. H. (2003, 7-10 Oct 2003). *Resolving Multiple Occluded Layers in Augmented Reality*. Communication présentée à Proceedings of Intl. Symposium on Mixed and Augmented Reality (Tokyo, Japan) 7–10 Oct 2003, Tokyo, Japan.

- Livingston, M., Zambaka, C., Swan li, J. E., & Smallman, H. S. (2005). Objective Measures for the Effectiveness of Augmented Reality.
- Loomis, J. M., & Knapp, J. M. (2003). Visual Perception of Egocentric distance in Real and Virtual Environments. Dans HETTINGER LJ and HAAS JW (Édit.), *Virtual and Adaptive Environments: Applications, Implications, and Human Performance Issues* (p. 21-46). Mahwah, NJ, USA.
- Mapp, A., Ono, H., & Barbeito, R. (2003). What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review. *Perception & Psychophysics*, 65(2), 310-317. doi: 10.3758/bf03194802
- Marsot, J., & Govaere, V. (2008). *Prévention des risques en maintenance industrielle: apports et limites des techniques de réalité augmentée*. Communication présentée à Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine, Metz, France.
- McCandless, J. W., Ellis, S. R., & Adelstein, B. D. (2000). Localization of a Time-Delayed, Monocular Virtual Object Superimposed on a Real Environment. *Presence*, 9 15-24.
- McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychol Bull*, 86(5), 889-918.
- Merrell, D. J. (1957). Dominance of eye and hand. *Human Biology*, 29 314-328.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12), 1-15.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1994). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telem manipulator and Telepresence Technology*, SPIE Vol. 2351 282-292.
- Mistry, P., Maes, P., & Chang, L. (2009). *WUW - Wear Ur World - A Wearable Gestural Interface* Communication présentée à CHI.
- Mohler, B. J., Creem-Regehr, S. H., & Thompson, W. B. (2006). The influence of feedback on egocentric distance judgments in real and virtual environments.
- Navab, N., Traub, J., Sielhorst, T., Feuerstein, M., & Bichlmeier, C. (2007). Action- and Workflow-Driven Augmented Reality for Computer-Aided Medical Procedures. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 27(5), 10-14. doi: 10.1109/mcg.2007.117
- Necker, L. A. (1832). LXI. Observations on some remarkable optical phænomena seen in Switzerland; and on an optical phænomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *Philosophical Magazine Series 3*, 1(5), 329-337. doi: 10.1080/14786443208647909
- Normand, J.-M., & Moreau, G. (2012, november 2012.). *DoF-based classification of Augmented Reality Applications* Communication présentée à IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) Workshop Atlanta GA.
- Normand, J.-M., Servières, M., & Moreau, G. (2012). *A new typology of augmented reality applications*. Communication présentée à Proceedings

- of the 3rd Augmented Human International Conference, Megève, France.
- Park, M., Schmidt, L., Schlick, C., & Luczak, H. (2007). Design and evaluation of an augmented reality welding helmet. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 17(4), 317-330. doi: 10.1002/hfm.20077
- Rash, C. E. (2008). A 25-year retrospective review of visual complaints and illusions associated with a monocular helmet-mounted display. *Displays*, 29 70-80.
- Raskar, R., Welch, G., Cutts, M., Lake, A., Stesin, L., & Fuchs, H. (1998). *The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays*. Communication présentée à Siggraph, Orlando, Florida.
- Reif, R., G. W. A., #252, nthner, Bj, #246, . . . Klinker, G. (2009). *Pick-by-Vision comes on age: evaluation of an augmented reality supported picking system in a real storage environment*. Communication présentée à Proceedings of the 6th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa, Pretoria, South Africa.
- Rohs, M. (2007). Marker-based embodied interaction for handheld augmented reality games. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 4(5).
- Rolland, J. P., & Arthur, K. (1997). Studies of depth judgments in a see-through head-mounted display. *SPIE Vol. 3058*
- Rolland, J. P., & Fuchs, H. (2000). Optical Versus Video See-Through Head-Mounted Displays in Medical Visualization.
- Rosenthal, V., & Visetti, Y.-M. (1999). Sens et temps de la Gestalt (Gestalt theory: critical overview and contemporary relevance) (vol. 28, p. 147-227).
- Ruffner, J. W., & Fulbrook, J. E. (2007). *Usability considerations for a tower controller near-eye augmented reality display*. Communication présentée à Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, Baltimore, MD (vol. 1, p. 117-121). Tiré de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-58149469779&partnerID=40&md5=a72d8b696e0680d6f5b65ad21aa2e3ea>
- Scapin, D. L., & Bastien, J. M. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & Information Technology*, 16 220-231.
- Schwald, B., Seibert, H., Schnaider, M., Wesarg, S., Röddiger, S., & Dogan, S. (2004). *Implementation and Evaluation of an Augmented Reality System Supporting Minimal Invasive Interventions*. Communication présentée à AMI-ARCS'04.
- Sener, B., & Wormald, P. (2008). User evaluation of HCI concepts for defining product form. *Design Studies*, 29(1), 12-29. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2007.06.003>

- Shuhaiber, J. H. (2004). Augmented reality in surgery. *Archives of Surgery*, 139(2), 170-174. doi: 10.1001/archsurg.139.2.170
- Singh, G., Swan li, J. E., Jones, A., & Ellis, S. R. (2010). *Depth Judgment Measures and Occluding Surfaces in Near-Field Augmented Reality*. Communication présentée à Proceedings of the Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV 2010).
- Son-Lik, T., Chee-Keong, K., Ming-Yeong, T., Ng Wan, S., & Keck-Voon, L. (1998). Augmented reality systems for medical applications. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, 17(3), 49-58. doi: 10.1109/51.677169
- Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics: Introduction to its Perceptual, Neural, and Social Prospects*. New York: Wiley.
- Stricker, D. (2002). Personalized Augmented Reality Touring of Archaeological Sites with Wearable and Mobile Computers. Dans *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Wearable Computers* (p. 15-22): IEEE Computer Society.
- Sugano, N., Kato, H., & Tachibana, K. (2003). *The Effects of Shadow Representation of Virtual Objects in Augmented Reality*. Communication présentée à Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'03).
- Sutherland, i. (1963). *Sketchpad: A man-machine graphical communication system*. (University of Cambridge).
- Swan li, J. E., jones, A., Kolstad, E., Livingston, M., & Smallman, H. S. (2007). Egocentric Depth Judgments in Optical, See-Through Augmented Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* pages 429–442.
- Swan li, J. E., Livingston, M., Smallman, H. S., Brown, D., Baillot, Y., Gabbard, J. L., & Hix, D. (2006). A Perceptual Matching Technique for Depth Judgments in Optical, See-Through Augmented Reality.
- Swan li, J. E., Livingston, M., Smallman, H. S., Gabbard, J. L., Brown, D., Baillot, Y., . . . Rosenblum, L. (2005). A Methodology for Quantifying Medium- and Far-Field Depth Perception in Optical, See-Through Augmented Reality.
- Swan, J. E., II, & Gabbard, J. L. (2005, July 22-27). *Survey of user-based experimentation in augmented reality*. Communication présentée à 1st International Conference on Virtual Reality, HCI International Las Vegas, Nevada.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cogn Psychol*, 12(1), 97-136.
- Vlahakis, V., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Almeida, L., Stricker, D., . . . Ioannidis, N. (2001). Archeoguide: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites. Dans *Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage (Glyfada, Greece)* (p. 131-140). New York: ACM.

- Waller, D. (1999). Factors Affecting the Perception of Interobject Distances in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(6), 657-670. doi: 10.1162/105474699566549
- Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 129-143. doi: 10.1162/105474698565631
- Willemsen, P., Colton, M. B., Creem-Regehr, S. H., & Thompson, W. B. (2004). The Effects of Head-Mounted Display Mechanics on Distance Judgments in Virtual Environments
- Willemsen, P., Gooch, A. A., thompson, W. B., & Creem-Regehr, S. H. (2005). Effects of stereo viewing conditions on distance perception in virtual environments.
- Wither, J., & Hollerer, T. (2005). *Pictorial Depth Cues for Outdoor Augmented Reality*. Communication présentée à Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers.
- Wither, J., & Höllerer, T. (2005). Pictorial Depth Cues for Outdoor Augmented Reality.
- Witmer, B. G., & Kline, P. B. (1998). Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 144-167. doi: 10.1162/105474698565640
- Woohun, L., & Jun, P. (2005, 5-8 Oct. 2005). *Augmented foam: a tangible augmented reality for product design*. Communication présentée à Mixed and Augmented Reality, 2005. Proceedings. Fourth IEEE and ACM International Symposium on (p. 106-109). doi: 10.1109/ismar.2005.16
- Wu, B., Klatzky, R. L., Shelton, D., & Stetten, G. (2005). Psychophysical Evaluation of In-Situ Ultrasound Visualization.
- Yeh, M., Wickens, C. D., & Seagull, J. F. (1998). *Conformality and target cueing: Presentation of symbology in augmented reality*. Communication présentée à Human Factors and Ergonomics Society.



# **Annexes**

# ANNEXE 1 - ANALYSE COMPARATIVE THÉORIQUE DES RESTITUTEURS DE RA

---

## A1.1 COMPARAISON DU FACTEUR DE CONFIGURATION : HMD VS HHD VS DEPORTE

Ce facteur de configuration (ou de forme) décrit comment le restituteur est positionné pour être consulté par l'utilisateur.

Dans le cas des HMD (Head Mounted Display), le restituteur est fixé sur la tête de l'utilisateur soit par un système de fixation spécifique, soit intégré à un autre équipement de tête déjà présent (casque de protection, lunette de vision nocturne, etc.). C'est la configuration privilégiée des restituteurs de réalité augmentée, car ils permettent de positionner les informations directement dans le champ visuel de l'utilisateur.

Dans le cas des HHD (Hand Held Display), le restituteur est maintenu à la main par l'utilisateur ou fixé sur son corps ou ses équipements. Avec la miniaturisation des systèmes électroniques, ce type de produit a envahi le marché grand public (téléphone portable, PDA, tablette LCD, etc.).

Enfin, les restituteurs déportés sont les plus anciens et les plus répandus. Ce sont par exemple les écrans intégrés dans un véhicule (ordinateur de bord, interface de tourelle de tir télé-opéré, périscope ou épiscopes dans un véhicule blindé, etc.). Ce sont généralement des technologies d'écran maîtrisées, fournissant une bonne qualité d'image et une grande fiabilité.

### A1.1.1 Analyse des restituteurs HMD

#### A1.1.1.1 *Avantages*

##### **Maturité et coût :**

De nombreux types de HMDs sont disponibles sur le marché. Certains HMD peuvent être moins chers que certains HHD car ils utilisent des écrans plus petits et moins lumineux, car l'image est présentée plus près de l'œil.

##### **Taille et poids :**

Les HMD sont conçus pour être très petits et légers, afin d'impacter au minimum la charge globale portée par le soldat.

##### **Consommation d'énergie :**

De par la petite taille de leurs écrans et leur plus faible luminance, les HMD consomment moins d'énergie que les HHD.

**Luminance :**

Les HMD n'ont pas besoin d'être aussi lumineux que les HHD car ils sont positionnés très près de l'œil et empêchent la lumière ambiante de se refléter sur l'écran et donc d'interférer avec l'image.

**Texte et symbologie :**

Les HMD affichent les données alphanumériques très proches de l'œil. Certains types de HMD fournissent d'ailleurs des images d'une clarté exceptionnelle pour le texte et les nombres.

**Conformalité :**

Les HMD permettent d'afficher des informations virtuelles (symbologie, caractères alphanumériques, etc.) directement dans le champ visuel de l'utilisateur. Il est donc possible d'accéder à ces informations en continu et en parallèle d'une autre activité (déplacement par exemple).

**Visibilité et lisibilité :**

Les HMD permettent d'afficher les informations très proches de l'œil ce qui permet de rendre leur lecture plus facile que sur un HHD.

**Basculement attentionnel :**

Les HMD affichant des informations de conformité, permettent de réduire l'accommodation oculaire nécessaire lors du basculement du focus attentionnel entre la symbologie et l'environnement réel. Ce gain de temps est bénéfique pour l'activité du soldat.

**Gêne physique :**

Grâce à leur forme et à leur utilisation « mains libres », les HMD ne génèrent que très peu de gêne physique. De plus, avec les avancées technologiques dans le domaine, la taille et le poids de ce type de restitué tendent à être de plus en plus faibles. La plupart des inconvénients physiques (encombrement, confort, etc.) de ces systèmes embarqués seront probablement résolus dans les années à venir.

**Mouvement de la tête et des yeux :**

En affichant les informations directement dans le champ visuel des soldats, les HMD permettent de réduire de façon importante le nombre et la durée des mouvements de la tête et des yeux qui auraient été nécessaires pour consulter un écran classique ou un HHD.

**Charge cognitive :**

En affichant les informations directement dans le champ visuel des soldats, les HMD permettent de réduire la charge cognitive nécessaire pour y accéder et facilitent leur intégration à la situation réelle perçue par l'utilisateur.

**Compatibilité avec les équipements :**

Les HMD peuvent être intégrés aux équipements de tête du soldat : casque de protection, lunettes, jumelle ou visière de protection, de telle sorte que les restitueurs soient toujours utilisables.

**Furtivité :**

Les HMD présentent moins de risque de nuire à la furtivité des fantassins car ils émettent moins de luminosité que les HHD et sont donc plus difficilement détectables par l'ennemi.

**Usage nocturne :**

Les HMD peuvent être intégrés aux équipements de vision nocturne (jumelle de vision nocturne, détecteur de chaleur, IR, etc.). De plus, la faible luminosité de l'environnement nocturne facilite la lisibilité des informations affichées sur les HMD.

**Usage en mobilité :**

Les HMD procurent les informations dont les fantassins ont besoin en mobilité, car ils fournissent une plateforme d'affichage numérique portable et facile d'accès car en « mains libres ».

**Détection de cibles :**

Les informations de conformalité affichées sur un HMD peuvent faciliter et réduire le temps de détection de cibles car le regard de l'utilisateur est continuellement dirigé vers l'environnement réel. De plus, les HMD apportent un avantage opérationnel par rapport à un restituteur déporté, car le restituteur étant fixé sur la tête du fantassin, celui-ci peut tourner la tête et rechercher dans l'environnement d'autres cibles. Enfin, dès que la cible est détectée, l'utilisateur peut suivre par de simples mouvements de tête les déplacements de cette dernière.

**A1.1.1.2 Inconvénients**

**Maturité et coût :**

Le prix de certains HMD peut être élevé, car ils requièrent des composants électroniques et optiques complexes très chers.

**Taille et poids :**

Malgré le poids contenu des HMD, ils exercent une charge non négligeable sur la tête, le cou et les épaules de l'utilisateur. De plus, cette charge supplémentaire peut modifier le centre de gravité de la tête et causer des sensations d'inconfort.

**Couleurs :**

Les HMD utilisant des écrans LCD ont un taux de contraste et de luminance beaucoup plus faible que ce que l'œil humain requière pour une discrimination optimale des couleurs.

**Résolution :**

La résolution des HMD est limitée par la taille maximale des écrans utilisés. En effet, leurs dimensions ne peuvent être beaucoup augmentées car les bords de l'écran dépasseront le champ de vision naturel de l'utilisateur. Par ailleurs, pour des IHM d'une résolution supérieure à 800\*600 pixels, la taille standard des caractères et des symboles sera trop petite pour être lisible.

#### **Troubles proprioceptifs :**

Un des inconvénients majeurs des HMD est le risque d'apparition de troubles perceptifs (rivalité binoculaire, suppression monoculaire, etc.) physiologiques (nausée, vertige, maux de tête) et proprioceptifs (mal du simulateur, déséquilibre, etc.). La nature et l'importance de ces risques dépendent fortement du type de restitution choisi. (Voir comparaison restitution)

#### **Occlusion visuelle :**

La monture mécanique d'un HMD pouvant être importante (particulièrement dans le cas des HMD vidéo see-through ou immersifs) il y a donc une réduction du champ de vision de l'utilisateur. De plus, l'utilisateur doit le retirer de son champ de vision pour percevoir l'environnement réel quand le restituteur est éteint (à l'exception des HMD optical see-through). L'avantage de l'utilisation « mains libres » est donc perdu dans ce cas précis.

#### **Champ de vision (total) :**

La majorité des HMD réduisent le champ de vision naturel des utilisateurs.

#### **Réglages et ajustements :**

Les HMD étant composés d'éléments optiques et électroniques très sensibles, ils sont susceptibles de se dérégler et de produire des erreurs dans l'alignement et l'orientation de l'affichage. Par ailleurs, grâce à la facilité d'utilisation et d'emport, les HMD sont des équipements risquant d'être utilisés sur de longues périodes de temps.

Cette utilisation prolongée requiert que le restituteur puisse être ajusté pour éviter une suraccommodation ou une perte du focus, ainsi que pour s'adapter aux différences inter-individuelles (particulièrement critiques dans le cas des restituteurs bi-oculaire ou binoculaire). Une sensible variation dans les réglages (alignement vertical, rotation, distance inter-pupillaire ou grossissement) peut apparaître en situation de mobilité. Ces dérèglements peuvent provoquer une difficulté de fusion des images gauche et droite, ainsi que couper les bords des images, ou les brouiller sérieusement.

#### **Usage collaboratif :**

Par définition, un HMD est un dispositif mono-utilisateur ; plusieurs soldats ne peuvent donc pas consulter simultanément les informations affichées un seul système.

#### **Usage en mobilité :**

Comme décrit précédemment, les vibrations et secousses provoquées par la mobilité de l'utilisateur risquent de dérégler l'affichage. Par ailleurs, les HMD réduisant de façon importante le champ de vision des soldats (à l'exception des HMD optical see-through), leur utilisation peut réduire les capacités motrices des utilisateurs.

#### **Détection de cibles :**

L'affichage d'indice de cible (symbologie correctement alignée sur une cible réelle) dans un HMD apporte un gain opérationnel important. Cependant, l'utilisateur risque de trop se reposer sur les informations virtuelles et de ne pas détecter d'éventuelles cibles imprévues dans l'environnement réel. Cette focalisation attentionnelle sur un espace informationnel au détriment de l'environnement réel représente une forme de tunnel cognitif.

## **A1.1.2 Analyse des restitués HHD**

### **A1.1.2.1 Avantages**

#### **Maturité et coûts :**

De nombreux types de HHD sont disponibles sur le marché. La plupart sont d'ailleurs moins chers que les HMD.

#### **Couleurs :**

À l'exception des HHD optical see-through (écrans transparents, jumelles et viseurs), les HHD sont des supports capables d'afficher toutes les couleurs car ils présentent un excellent contraste et une très bonne qualité d'image.

#### **Texte et symbologie :**

Grâce à l'excellente qualité d'image de la plupart des HHD, ceux-ci sont capables d'afficher les textes et images les plus nets.

#### **Conformalité :**

Certains types de HHD (optical ou vidéo see-through) sont capables d'afficher des informations de conformité dans l'environnement réel de l'utilisateur.

#### **Vidéo et IHM complexe :**

À l'exception des HHD optical see-through (jumelles, viseurs), la taille des écrans peut être augmentée pour pouvoir afficher des vidéos ou des IHM en haute résolution.

#### **Troubles proprioceptifs :**

Il y a un risque réduit que les soldats subissent les symptômes du mal des simulateurs lors de l'utilisation d'HHD comparé à un HMD. Ils causent moins de problèmes de perception que les

HMD parce qu'ils ne sont pas totalement immersifs et ne reposent pas sur des processus physiologiques ou psychologiques pour améliorer la perception de la profondeur ou le champ de vision de l'utilisateur.

**Occlusion visuelle :**

L'avantage principal des HHD par rapport aux HMD, est qu'ils ne réduisent pas le champ de vision total de l'utilisateur et n'entravent pas le champ périphérique quand le restitué n'est pas en fonctionnement.

**Visibilité et lisibilité :**

Les HHD fournissent aux utilisateurs une flexibilité d'usage leur permettant de consulter l'affichage de n'importe quel angle de vision (à l'exception des jumelles et viseurs).

**Champ de vision (total) :**

Le champ de vision du fantassin n'est pas impacté par l'usage d'un HHD car il peut continuer à percevoir son environnement partout autour du système.

**Charge cognitive :**

L'utilisation de la plupart des HHD nécessite moins de ressources cognitives car leur utilisation se rapproche de systèmes largement répandus dans le commerce grand public. De plus, les HHD immersifs ne superposent pas d'information de conformalité, il n'y a donc pas de risque de tunnel cognitif.

**Réglages et ajustements :**

A l'exception des jumelles et viseurs, les autres HHD n'ont pas besoin d'être ajustés aux caractéristiques visuelles des utilisateurs (distance inter-pupillaire, relief d'œil, etc.).

**Compatibilité avec les équipements :**

Un HHD peut être intégré dans les vêtements du soldat, ou fixé sur son arme par exemple.

**Usage collaboratif :**

Un HHD peut être positionné de façon à ce que plusieurs utilisateurs puissent consulter simultanément les informations qui y sont affichées. Cet aspect est important pour le partage des informations au sein d'un groupe de soldats, car ils peuvent pointer une information précise sur l'écran et en discuter, tout en ayant un référentiel commun.

**Usage en mobilité :**

En raison de la taille importante de l'écran et de la distance à l'œil, les HHD sont moins sensibles aux vibrations et plus faciles à lire que les HMD en phase de mobilité.

### **A1.1.2.2 Inconvénients**

#### **Maturité et coût :**

Certains HHD sont plus chers que les HMD, à cause de la grande taille de leurs écrans et du fait qu'ils ont besoin d'être plus lumineux

#### **Taille et poids :**

Les HHD ont tendance à être plus grands et plus lourds que les HMD. Ce poids risque de contribuer de façon importante à la charge globale transportée par les fantassins.

#### **Consommation d'énergie :**

Les technologies d'écran utilisées dans les HHD consomment plus d'énergie que les HMD car ils ont tendance à être plus grands et plus lumineux pour pouvoir être lisibles à une plus longue distance de l'œil. Cependant, de nouvelles technologies, telles que les écrans OLED, tendent à consommer moins d'énergie et à fournir des angles de vision encore plus larges, des taux de contraste élevés ainsi qu'un temps de réponse plus court.

#### **Luminance :**

Les HHD doivent être extrêmement lumineux pour pouvoir être lisibles malgré une forte luminosité ambiante qui peut aussi provoquer des reflets réduisant de façon importante la lisibilité de l'affichage.

#### **Conformalité :**

A l'exception des HHD optical see-through (jumelles, viseurs) et vidéo see-through (PDA avec caméra), les HHD ont tendance à être maintenus horizontalement. Dans ce cas-là, l'affichage d'information de conformité n'est pas adapté.

#### **Visibilité et lisibilité :**

Un des principaux inconvénients des HHD est le fait que l'utilisateur doit positionner l'écran de telle sorte qu'il soit lisible (angle de vision, suppression des reflets du soleil, distance à l'œil, etc.). Dans le cas des HHD see-through, le soldat doit aussi positionner le système soit devant lui (PDA avec caméra), soit le maintenir devant les yeux (jumelles et viseurs).

#### **Basculement attentionnel :**

Un autre inconvénient majeur des HHD et particulièrement pour les HHD immersifs (tablette LCD) est que l'utilisateur doit regarder alternativement son système, puis les objets distants dans l'environnement réel. Les yeux doivent donc s'accommoder en permanence pour permettre la lisibilité d'informations proches, puis lointaines. Ce processus peut prendre jusqu'à plusieurs secondes. Cette durée peut être inacceptable dans certaines situations.

**Charge cognitive :**

Malgré la facilité et la familiarité d'usage des HHD immersifs (tablette LCD, PDA), ces systèmes impliquent une surcharge cognitive pour accomplir des tâches de navigation spatiale en 3D. Même si les reconstituteurs sont positionnés près de l'œil, l'utilisateur devra effectuer une transformation mentale (rotation et translation) des informations de navigation 2D en une représentation 3D en cohérence avec la situation réelle (l'environnement qu'il perçoit et sa position dans celui-ci).

**Gêne physique :**

Par définition, les HHD ne sont pas utilisables sans les mains. Ce fait peut poser problème dans certaines situations où le fantassin doit utiliser ses mains pour d'autres tâches plus importantes (situation de combat, pilotage, phase de mobilité complexe etc.). De plus, comme décrit précédemment, les HHD doivent être positionnés manuellement pour pouvoir être lisibles dans de bonnes conditions.

**Mouvement des yeux et de la tête :**

Un autre inconvénient des HHD est le nombre et la fréquence importante de mouvements de la tête et des yeux nécessaires pour consulter alternativement le reconstituteur et l'environnement.

**Compatibilité avec les équipements :**

Les HHD n'étant pas « mains libres », ils peuvent gêner l'utilisation des autres équipements du fantassin. Dans le cas des HHD intégrés aux vêtements du soldat, il y a des risques d'interférence entre les vêtements et la consultation du système par exemple.

**Furtivité :**

Les écrans des HHD (à l'exception des jumelles et des viseurs) étant très lumineux pour être lisibles à une certaine distance de l'œil, ils sont donc plus facilement détectables par les ennemis.

**Détection de cibles :**

Dans une tâche de détection de cible, l'utilisation d'un HHD réduit les performances de l'utilisateur (précision de la reconnaissance, temps de réaction, etc.) comparativement à l'utilisation d'un HMD.

**A1.1.3 Analyse des reconstituteurs déportés****A1.1.3.1 Avantages****Maturité et coûts :**

C'est le mode de restitution le plus répandu, ce qui permet d'atteindre une maturité technologique et des coûts de fabrication très satisfaisants.

**Robustesse :**

Ce sont les écrans les plus robustes, car intégrés dans un véhicule ou un équipement plus important, ils peuvent être renforcés sans craindre d'augmenter le poids de façon rédhibitoire.

**Contraste, couleurs et luminance :**

Ce sont les reconstituteurs fournissant les meilleures performances graphiques, ainsi que les plus grandes résolutions grâce à la taille importante de leurs écrans.

**Textes et symbologie :**

Ces systèmes sont parfaitement capables d'afficher des caractères alphanumériques, ainsi que de la symbologie colorée.

**Conformalité :**

Selon le type de reconstituteur déporté (HUD, périscopes, épiscopes, blindage transparent), il est possible d'afficher des informations de conformité dans l'environnement proche du véhicule ou dans le cas des écrans immersifs, d'afficher des informations de conformité d'un environnement distant (téléopération d'un drone ou d'un robot par exemple).

**Vidéo et IHM complexe :**

Les reconstituteurs encastrés (et particulièrement les écrans durcis embarqués) peuvent afficher n'importe quel type d'image, vidéo ou même IHM graphique.

**Troubles proprioceptifs :**

Les reconstituteurs déportés étant intégrés à un véhicule ou un équipement débarqué, ils sont utilisés en position statique des utilisateurs. Il n'y a donc que très peu de risque d'apparition de troubles proprioceptif et/ou perceptif.

**Occlusion visuelle :**

La position de ce type d'écran étant indépendante de la position de l'utilisateur, son champ de vision n'est pas perturbé. Les écrans déportés ne sont pas solidaires du corps du fantassin, celui-ci peut donc se déplacer et observer son environnement de façon indépendante.

**Visibilité et lisibilité :**

Dans le cas des écrans déportés immersifs (écrans durcis), les excellentes performances graphiques apportent une lisibilité de l'affichage largement suffisante.

**Champ de vision (total) :**

Mis à part les restituteurs de type périscopes ou épiscopes, les restituteurs embarqués ne restreignent pas le champ de vision naturel des utilisateurs.

**Gêne physique :**

Ces restituteurs étant intégrés dans un véhicule ou dans un équipement débarqué, ils n'entravent pas les capacités motrices des utilisateurs et ne nécessitent pas d'être portés ou saisis pour être consultés. La taille et le poids n'impactent donc pas les capacités physiques et motrices des utilisateurs.

**Réglages et ajustements :**

La plupart des restituteurs de ce type ne nécessitent que très peu de réglages (orientation) pour pouvoir être facilement consultés par les utilisateurs.

**Compatibilité avec les équipements :**

Ces restituteurs n'étant ni saisis ni portés par l'utilisateur, ils n'interfèrent pas avec l'utilisation d'autres équipements.

**Furtivité :**

Dans le cas des restituteurs embarqués, l'émission lumineuse ne peut être que difficilement perçue depuis l'extérieur du véhicule et donc nuisent moins à la furtivité que les HHD ou les HMD.

**Usage nocturne :**

La luminosité de ces restituteurs peut être adaptée pour ne pas perturber la vision nocturne des utilisateurs (dilatation pupillaire).

**Usage collaboratif :**

La plupart de ces restituteurs (à l'exception des périscopes et épiscopes) peuvent être consultés par plusieurs utilisateurs simultanément, dans la limite des angles de visibilité propres à chaque produit.

**Détection de cibles :**

L'un des principaux avantages de ces restituteurs est de permettre aux occupants d'un véhicule équipé d'avoir une perception augmentée de leur environnement proche. Ces systèmes peuvent compenser les nombreux angles morts dus au blindage important des véhicules militaires.

**A1.1.3.2 Inconvénients**

**Taille et poids :**

A l'exception des HUD, ce sont les restitueteurs les plus grands et les plus lourds.

**Consommation d'énergie :**

De par leur taille, les moyens de restitution déportés nécessitent plus d'énergie que les HMD ou les HHD.

**Troubles proprioceptifs :**

Dans le cas des restitueteurs immersifs embarqués, leur utilisation en cours de déplacement du véhicule peut produire chez les utilisateurs l'effet du mal des transports (nausée, vertiges). Ce phénomène est particulièrement susceptible d'apparaître dans le cas où c'est un passager du véhicule qui consulte les informations affichées sur le restitueteur et que le véhicule se déplace de façon non linéaire (Virages, circulation urbaine, terrain accidenté, etc.).

Dans ce cas de figure, la décorrélation entre les informations visuelles et les informations vestibulaires de l'utilisateur peut produire les symptômes du mal des transports.

**Visibilité et lisibilité :**

La lisibilité des restitueteurs embarqués peut être dégradée par les reflets du soleil filtrant par les diverses ouvertures (pare-brise, hublots, etc.), ils doivent donc être positionnés en fonction.

**Basculement attentionnel :**

Ces restitueteurs étant intégrés dans un véhicule ou sur un équipement débarqué, ils ont un emplacement fixe. A l'exception des HUD, les utilisateurs devront donc effectuer un déplacement (corps, tête, ou regard) pour accéder à ces systèmes. Ils nécessitent donc un basculement alternatif du focus attentionnel des utilisateurs pour pouvoir être consultés.

**Mouvement de la tête et des yeux :**

Comme décrit précédemment, ce type de restitueteur nécessite des mouvements de l'utilisateur pour pouvoir être consulté. Mis à part les HUD, l'emplacement de ces systèmes sera en dehors du champ de vision de l'utilisateur pour ne pas gêner sa tâche principale (pilotage par exemple).

**Usage en mobilité :**

Certains restitueteurs embarqués (périscopes, restitueteurs immersifs) sont difficilement consultables en cas de déplacement du véhicule à vive allure et/ou en cas de terrain accidenté.

## **A1.2 COMPARAISON DE LA RESTITUTION : MONOCULAIRE VS BI-OCULAIRE VS BINOCULAIRE**

Les restituteurs monoculaires sont les plus répandus dans les systèmes militaires. Cependant, ils ne sont pas exempts de défauts. La vision naturelle repose sur le principe de stéréoscopie, c'est-à-dire que chaque œil perçoit une image légèrement différente de l'autre. Cette différence est provoquée par la distance séparant la position de chaque œil, et c'est justement grâce à ce décalage, que nous pouvons apprécier une distance, percevoir le volume d'un objet, ou percevoir la profondeur.

Cependant, le système visuel humain ne se base pas uniquement sur ce seul indice visuel pour percevoir en 3 dimensions, il existe un ensemble d'autres indices visuels monoculaires permettant de confirmer l'inférence neurocognitive de profondeur.

Entre ces deux types de restitution se trouve le bi-oculaire, qui, lui, consiste à présenter la même image ou les mêmes informations aux deux yeux. Ce principe se rapproche alors plus de notre fonctionnement naturel, mais sans en apporter tous ses avantages (pas de stéréoscopie).

### **A1.2.1 Analyse des restituteurs monoculaires**

#### **A1.2.1.1 Avantages**

##### **Maturité et coût :**

Les restituteurs monoculaires sont généralement moins chers que les bi-oculaires ou binoculaires

##### **Taille et poids :**

Un restituteur monoculaire comporte moins de composants optiques qu'un système bi-oculaire ou binoculaire, par conséquent, la taille et le poids sont généralement plus faibles.

##### **Consommation d'énergie :**

De la même manière, les monoculaires ne comportant qu'un seul écran de restitution, ils consomment moins d'énergie que les systèmes bi-oculaires ou binoculaire.

##### **Troubles proprioceptifs :**

Les utilisateurs de restituteurs monoculaires présentent moins de risque de subir le mal du simulateur que ceux utilisant des binoculaires. Même si les restituteurs monoculaires peuvent provoquer des effets secondaires sur la perception et la proprioception, ils seront moins graves que ceux provoqués par des systèmes binoculaires.

**Occlusion visuelle :**

Par définition, un restituteur monoculaire se positionne seulement devant un œil, par conséquent, le champ visuel de l'utilisateur est beaucoup moins perturbé que par un système présent devant les deux yeux.

**Réglages et ajustements :**

Un des avantages majeurs des monoculaires est le fait qu'ils ne présentent pas les problèmes d'alignement binoculaire, ni de fatigue oculaire qui en découle.

**A1.2.1.2 Inconvénients****Champ de vision augmenté :**

Un des inconvénients majeurs de la restitution monoculaire est la taille limitée du champ de vision augmentée. Dans le cas des HMD, les restituteurs monoculaires fournissent en moyenne un champ de vision de 30°.

**Conformalité :**

Les restituteurs monoculaires (pour les restituteurs see-through) sont capables d'afficher des informations de conformité. Cependant, par l'absence de la vision stéréoscopique, il est beaucoup plus difficile d'afficher des informations de profondeur ou de distance.

**Troubles proprioceptifs :**

Malgré l'absence des risques de trouble proprioceptif liés à la vision binoculaire, les restituteurs monoculaires peuvent produire un certain nombre de troubles perceptifs ou proprioceptifs plus ou moins perturbants. Les deux principaux risques sont les phénomènes de rivalité binoculaire (suppression alternative dynamique de l'une des deux images perçues, quand les deux images sont très différentes) et de suppression monoculaire (suppression continue de l'une des deux images).

Par ailleurs, certains utilisateurs peuvent avoir beaucoup de difficulté à alterner volontairement leur attention d'une image perçue par un œil, à l'autre.

**Visibilité et lisibilité :**

Une différence de luminance entre les deux yeux peut provoquer certaines difficultés perceptives. Ce phénomène de « lustre binoculaire » produit un effet d'une surface réfléchissante brillante qui peut perturber la perception de la profondeur d'un objet. Ce phénomène peut autant apparaître dans le cas d'une restitution binoculaire mal calibrée, ou dans le cas d'une restitution monoculaire où la luminance affichée est très différente de celle perçue par l'œil non équipé.

**Perception de la profondeur :**

La perception de la profondeur est basée (pour la vision humaine naturelle) sur l'analyse d'un ensemble d'indices visuels et de processus proprioceptifs particuliers. La vision stéréoscopique (comparaison de la différence des images perçues par les deux yeux) est l'un des processus principaux permettant la perception de la profondeur, de la distance et du relief. Dans le cas d'une restitution monoculaire, il n'est donc pas possible de produire ce phénomène, et donc il sera nécessaire de se baser sur d'autres indices visuels pour afficher des informations tridimensionnelles ou de conformalité. Toutefois, des indices visuels de profondeurs incomplets peuvent produire de fausses informations de perception, voire une distorsion.

**Usage nocturne :**

La luminance d'un restituteur monoculaire implique une adaptation de l'œil utilisé (contraction pupillaire) qui se produit aussi sur l'autre œil. Par conséquent, aucun des deux yeux n'est en bonne condition pour effectuer de la vision nocturne.

**Usage collaboratif :**

Tout restituteur monoculaire est, par essence, mono-utilisateur car il nécessite une utilisation à une distance très réduite de l'œil de l'utilisateur.

**Détection de cibles :**

Les restituteurs monoculaires sont moins efficaces pour des tâches de détection de cibles car ils fournissent un champ de vision plus réduit. De plus, certains utilisateurs ont besoin de fermer l'autre œil pour pouvoir concentrer leur attention sur l'image perçue par l'œil équipé.

## **A1.2.2 Analyse des restituteurs bi-oculaires**

### **A1.2.2.1 Avantages**

#### **Maturité et coût :**

Les restituteurs bi-oculaires sont moins chers que les systèmes binoculaires stéréoscopiques.

#### **Taille et poids :**

Les restituteurs bi-oculaires comportent moins de composants optroniques que les systèmes binoculaires et sont donc moins lourds.

#### **Troubles proprioceptifs :**

Les phénomènes de rivalité binoculaire ou de suppression monoculaire sont supprimés dans les systèmes bi-oculaires, car la même image est affichée devant chaque œil.

#### **Usage collaboratif :**

A l'exception des restituteurs bi-oculaires proches de l'œil (HMD ou périscope), plusieurs utilisateurs peuvent consulter simultanément les informations affichées.

#### **Détection de cibles :**

Les restituteurs bi-oculaires (et particulièrement dans le cas des HMD) sont plus efficaces dans des tâches de détection de cibles que les systèmes monoculaires. Chaque œil a une chance de détecter une cible indépendamment de l'autre, et les deux yeux ensemble ont plus de chance qu'un seul œil. De plus, les indices de cibles sont détectés plus rapidement en bi-oculaire qu'en monoculaire.

Enfin, les restituteurs bi-oculaires fournissent un champ de vision augmenté plus important que les monoculaires, donc l'utilisateur aura moins de mouvements de tête à effectuer pour explorer visuellement l'environnement.

### **A1.2.2.2 Inconvénients**

#### **Taille et poids :**

Les restituteurs bi-oculaires sont plus lourds et plus encombrants que les systèmes monoculaires.

#### **Consommation d'énergie :**

Ils consomment aussi plus d'énergie que les monoculaires car ils ont, soit un écran par œil, soit un seul écran plus grand.

#### **Conformalité :**

Comme dans le cas des systèmes monoculaires see-through, il est possible d'afficher des informations de conformalité, mais les indices visuels de profondeur ne pourront pas se reposer sur la vision stéréoscopique naturelle.

#### **Troubles proprioceptifs :**

Dans le cas d'une utilisation prolongée de HMD bi-oculaires immersifs, il y a un risque d'apparition du mal des simulateurs. Des séquelles de ce phénomène peuvent impacter les performances des soldats concernant leurs capacités d'équilibre, de visée et de performances visuelles sur une période prolongée.

#### **Perception de la profondeur :**

Comme décrit précédemment, les systèmes bi-oculaires ne peuvent fournir des indices visuels stéréoscopiques de profondeur. Il faut donc que le système fournisse des indices de profondeur monoculaire basés sur l'interposition, la perspective, l'ombrage, les textures, etc. Toutefois, ces indices ne fournissent que des informations limitées sur la profondeur et ne pourront que permettre une perception ambiguë ou moins efficace que la stéréoscopie.

#### **Réglages et ajustements :**

Les systèmes bi-oculaires comportent tous les inconvénients de réglage et d'ajustement d'un système binoculaire sans apporter la stéréoscopie. De mauvais réglages (alignement interpupillaire par exemple) peuvent conduire à des problèmes perceptifs.

### **A1.2.3 Analyse des restituteurs binoculaires**

#### **A1.2.3.1 Avantages**

##### **Champ de vision augmenté :**

Les restituteurs binoculaires ont le potentiel d'augmenter le champ de vision horizontal en réglant la superposition des deux images. En « écartant » les deux champs visuels, cela réduit la partie commune, mais augmente la largeur totale du champ de vision augmenté.

##### **Conformalité :**

Les systèmes binoculaires permettent d'afficher des informations de conformalité en y intégrant des informations de distance grâce à la stéréoscopie. Pour l'utilisateur, cet indice visuel de profondeur est le plus fiable et le plus facile à interpréter.

##### **Perception de la profondeur :**

Les systèmes binoculaires sont les seuls à pouvoir fournir une vision stéréoscopique. Ils ont alors l'avantage de permettre aux utilisateurs de percevoir la différence entre des objets proches et éloignés. La stéréoscopie se base sur la convergence oculaire, ainsi que sur la disparité rétinienne pour évaluer la distance d'un objet. Des traitements neurocognitifs

permettent de comparer les différences entre les deux images perçues par chaque œil afin d'obtenir la correspondance d'un point particulier d'un objet. Ensuite l'angle de convergence nécessaire pour obtenir ce recouvrement est utilisé pour évaluer la distance de l'objet. Tous ces processus sont parfaitement automatisés et inconscients et ne demandent pas de ressources attentionnelles particulières de l'utilisateur.

#### **Usage nocturne :**

En usage nocturne, certaines études ont montré que les restituements binoculaires sont plus performants pour percevoir efficacement l'environnement (relief, obstacle, etc.), et que le confort et la fiabilité de la perception sont meilleurs qu'avec les systèmes mono ou bi-oculaires.

#### **Détection de cibles :**

Comme pour les systèmes bi-oculaires, l'utilisation des deux yeux améliore les performances des utilisateurs dans une tâche de détection de cibles et permet, en plus, de percevoir plus facilement la distance de ces cibles.

#### *1.1.1.1 Inconvénients*

#### **Maturité et coût :**

Les systèmes binoculaires sont les plus complexes et les plus chers du marché.

#### **Taille et poids :**

Les restituements binoculaires sont les plus lourds et les plus encombrants car ils nécessitent plus de composants optiques que les systèmes mono ou bi-oculaires.

#### **Consommation d'énergie :**

Ils consomment aussi plus d'énergie que les autres systèmes.

#### **Troubles proprioceptifs :**

Lors de la vision stéréoscopique, l'assemblage des deux images perçues par chaque œil permet de fusionner les informations pour produire la perception d'un seul objet. La région du champ visuel où cette fusion a lieu s'appelle la zone de fusion de Panum. Si la disparité binoculaire est supérieure à la taille de cette zone, alors l'utilisateur percevra une double image floue (diplopie). Ce phénomène peut produire des effets de nausée, de fatigue oculaire et une diminution des performances visuelles dans le cas d'une utilisation prolongée d'un HMD binoculaire par exemple.

#### **Réglages et ajustements :**

Les restituements binoculaires sont les systèmes qui requièrent les réglages et les ajustements les plus précis pour pouvoir être utilisés dans de bonnes conditions. Une calibration optique précise ainsi qu'un alignement fin entre les deux yeux est nécessaire pour éviter les problèmes

perceptifs et proprioceptifs tels que la rivalité binoculaire, la suppression monoculaire, ainsi que la diplopie.

**Usage collaboratif :**

Comme les restituteurs binoculaires doivent être très proches des yeux, ces systèmes ne peuvent pas être utilisés par plusieurs soldats simultanément.

## **A1.3 COMPARAISON DE LA TRANSPARENCE : OPTIQUE VS VIDEO VS IMMERSIF**

Les technologies de restitution visuelle ont historiquement débuté par le développement d'afficheurs immersifs (non transparents). Depuis la création du cinéma, jusqu'aux mini-écrans plats de nos téléphones portables, ce domaine de recherche n'a cessé d'évoluer et ne semble pas prêt de s'arrêter. Les restituteurs transparents ont pour leur part, un historique beaucoup plus récent, (vers les années 1960 pour les HUD des pilotes d'avion de chasse), mais sont les restituteurs privilégiés de la réalité augmentée. En effet, l'objectif de ce domaine est de pouvoir afficher directement des informations dans le champ de vision de l'utilisateur. Par conséquent, l'évolution de ces technologies see-through n'a réellement débuté qu'avec les progrès de la recherche en réalité virtuelle. Même si, théoriquement, les restituteurs transparents semblent les mieux placés pour ce type d'application, leurs limitations technologiques permettent de trouver encore certains avantages aux restituteurs immersifs.

### **A1.3.1 Analyse des restituteurs optical see-through**

#### **A1.3.1.1 Avantages**

##### **Maturité et coût :**

Les restituteurs optiques transparents (optical see-through) deviennent très répandus sur le marché et sont généralement moins chers que les systèmes plus complexes, tels que les systèmes de projection rétinienne ou vidéo see-through.

##### **Taille et poids :**

Dans le cas des HMD, les systèmes optiques transparents sont les restituteurs les moins lourds et les plus confortables.

##### **Conformalité :**

Il est possible d'afficher des informations de conformité sur les restituteurs optiques transparents. L'utilisateur pourra donc percevoir les informations virtuelles superposées à sa perception directe de l'environnement.

##### **Troubles proprioceptifs :**

La plupart des restituteurs optiques transparents n'affectent pas la perception visuelle de l'environnement et donc n'entraînent pas de troubles perceptifs ou proprioceptifs. Les processus neurocognitifs de gestion de la motricité qui se basent sur les indices visuels issus du champ périphérique ne sont pas impactés. Le mal du simulateur, par exemple, ne peut pas se produire avec ce type de système.

##### **Occlusion visuelle :**

Les reconstituteurs optiques gênent très peu la perception de l'environnement réel. Les taux de contraste et de luminance de la symbologie affichée ne sont pas suffisants pour perturber la visibilité des éléments réels. De plus, même quand le système n'est pas en fonctionnement, l'utilisateur peut continuer à percevoir son environnement proche sans avoir à enlever le reconstituteur.

**Champ de vision (total) :**

La plupart des HMD optiques ont un champ de vision augmenté entre 20° et 60°, mais comme l'utilisateur peut percevoir l'environnement « autour » du reconstituteur, le champ de vision naturel est très peu réduit.

**Perception de la profondeur :**

La vision stéréoscopique naturelle est préservée, car l'utilisateur perçoit l'environnement réel avec les deux yeux. La perception de la profondeur est donc possible pour les éléments réels, mais la perception d'objet virtuel distant nécessite tout de même un système stéréoscopique (une image virtuelle légèrement différente pour chaque œil).

**Gêne physique :**

Dans le cas des HMD, l'utilisateur n'a pas besoin d'enlever le reconstituteur pour percevoir son environnement réel. Il y a donc une économie de gestes et d'actions qui auraient pu être gênants dans certaines situations.

**Usage nocturne :**

En usage nocturne, la faible luminosité ambiante permet de favoriser la lisibilité des informations affichées sur le reconstituteur optique.

**Usage en mobilité :**

Le poids modéré et la taille réduite des HMD optiques permettent aux fantassins de pouvoir les utiliser sur de longues périodes, de façon plus confortable que des systèmes plus complexes et plus lourds, tels que les reconstituteurs vidéos transparents. De plus, comme décrit précédemment, le champ visuel périphérique n'étant pas ou peu altéré, l'utilisateur peut facilement se déplacer.

**Détection de cibles :**

Les reconstituteurs optiques transparents peuvent être utilisés pour des tâches de détection de cibles grâce à l'affichage d'informations de conformalité. De plus, l'utilisateur peut aussi explorer visuellement l'environnement réel pour détecter d'autres cibles non indicées.

**A1.3.1.2 Inconvénients**

**Robustesse :**

Les systèmes optiques transparents sont plus fragiles que les systèmes immersifs ou vidéo transparents. Les composants optiques sont plus exposés aux contraintes environnementales et peuvent être rayés ou altérés.

#### **Couleurs/luminance/contraste :**

Alors que des reconstituteurs optiques transparents couleurs ont été développés, le faible taux de luminance et de contraste peut ne pas être suffisant pour permettre une bonne visibilité et lisibilité de la symbologie colorée selon la nature du paysage d'arrière-plan. L'utilisation d'une visière plus sombre entre l'environnement réel et l'afficheur permettrait d'améliorer le contraste et donc de compenser la faible luminance. En outre, les reconstituteurs monochromes fournissent un meilleur contraste et une meilleure lisibilité mais les possibilités d'affichage sont donc réduites.

Par ailleurs, ce type de reconstituteurs s'accompagne de différents problèmes optiques tels l'apparition d'image fantôme (tâche de couleur par exemple) ou une irisation colorée sur les contours de l'afficheur.

#### **Texte et symbologie :**

Comme décrit précédemment, la couleur et la luminosité ambiante de l'environnement peuvent réduire dramatiquement la lisibilité des informations affichées, même si les systèmes sont capables de les produire.

#### **Conformalité :**

Les informations de conformité nécessitent d'être correctement alignées sur leurs référents réels présents dans l'environnement visuel de l'utilisateur. Ce recalage nécessite un ensemble de capteurs de position et d'orientation de la tête de l'utilisateur qui peuvent ne pas être assez précis pour aligner correctement les objets virtuels sur les objets réels. Par exemple, si une flèche rouge pointe la position d'un ennemi, de la précision de son positionnement dépendra la validité de l'information. Si la flèche est toujours mal positionnée ou de façon peu précise, l'utilisateur n'aura pas confiance dans les informations fournies par le système et cela représenterait un risque important de refus de son utilisation. Cet alignement est plus difficile à effectuer dans un système optique see-through que dans un vidéo see-through, car ce dernier peut s'appuyer sur du traitement d'image pour reconnaître les référents réels.

Enfin, pour que l'information virtuelle soit perçue comme intégrée dans l'environnement réel, le système doit donner l'impression à l'utilisateur que les deux informations sont affichées à la même distance. Si le soldat doit effectuer une accommodation oculaire pour pouvoir percevoir l'une ou l'autre information, il y a un risque de tunnel cognitif et d'augmentation de la charge mentale. La distance de collimation de la symbologie doit être virtuellement à l'infini, afin que l'utilisateur puisse la lire sans ré-accommodation, tout en conservant la perception de son environnement proche ou distant.

#### **Vidéo et IHM complexe :**

Les reconstituteurs optiques transparents sont limités en ce qui concerne l'affichage d'image complexe ou de vidéo. La résolution et le contraste étant plutôt limités, ce type de système est plus adapté pour du texte et de la symbologie. Cependant, pour compenser le faible contraste, l'utilisation d'un capot occlusif derrière l'afficheur permettrait de rendre une vidéo lisible.

#### **Occlusion visuelle :**

Un des problèmes majeurs des reconstituteurs transparents est le risque d'occlusion visuelle. L'affichage d'une information virtuelle peut masquer un élément présent dans l'environnement réel. Ce risque est limité dans le cas des reconstituteurs optiques transparents car le contraste et la luminance peuvent être insuffisants pour occulter complètement un objet réel plus lumineux. Malgré tout, la visibilité des objets réels est réduite et peut compromettre gravement l'activité d'un fantassin.

#### **Visibilité et lisibilité :**

C'est l'inconvénient majeur des systèmes optiques transparents. Par la combinaison de toutes les raisons expliquées précédemment, les informations affichées peuvent être très difficiles à lire selon l'environnement réel en arrière-plan.

#### **Basculement attentionnel :**

En dépit de l'avantage opérationnel évident des reconstituteurs transparents, il peut y avoir certains problèmes dans le traitement cognitif parallèle entre les informations affichées et l'environnement réel. Des recherches semblent indiquer que le système visuel humain analyse les informations affichées comme appartenant à un espace perceptuel, et l'environnement réel à un autre. La transition entre le traitement d'un espace perceptuel et le traitement de l'autre implique un basculement de l'attention spatiale car les ressources cognitives sont limitées. D'autres études indiquent que lorsque l'attention de l'utilisateur est focalisée sur les informations d'un HUD par exemple, des informations apparaissant dans l'environnement réel ne sont pas perçues. Ce problème de tunnel cognitif est central dans la conception de systèmes de réalité augmentée.

#### **Furtivité :**

Les reconstituteurs optiques étant transparents des deux cotés, la luminosité émise pour l'affichage des informations peut être perçue par les ennemis.

#### **Usage collaboratif :**

La lisibilité des informations sur un système optique dépend du point de vue de l'utilisateur. Plusieurs utilisateurs ne pourront que partiellement consulter simultanément le système.

## **A1.3.2 Analyse des restitueurs vidéo see-through**

### **A1.3.2.1 Avantages**

#### **Couleurs/contraste/luminance :**

Les restitueurs vidéo transparents fournissent une excellente qualité graphique (couleurs, contraste, luminance) car ils utilisent des écrans occlusifs pour afficher les informations augmentées, ainsi que la retransmission vidéo de l'environnement réel de l'utilisateur.

#### **Champ de vision augmenté :**

Les composants montés sur les restitueurs vidéo transparents peuvent être choisis et ajustés pour augmenter le champ de vision jusqu'à 360° (par des optiques panoramiques). Ce sont donc les systèmes qui offrent les champs de vision augmentés les plus larges.

#### **Texte et symbologie :**

L'affichage de texte et de symbologie ne posent aucun problème pour ce type de restitueur.

#### **Conformalité :**

Les restitueurs vidéo transparents peuvent afficher des informations de conformité directement sur le flux vidéo de l'environnement réel. De plus, via des algorithmes de traitement vidéo, le recalage des informations virtuelles sur les objets réels est facilité par rapport aux systèmes optiques transparents.

#### **Vidéo et IHM complexe :**

En raison des performances graphiques des écrans occlusifs, ces systèmes peuvent afficher n'importe quel type d'information (photos, vidéo, IHM complexes).

#### **Perception de la profondeur :**

Ces systèmes sont compatibles avec la vision stéréoscopique. L'utilisation de deux caméras et de deux écrans de restitution (un ensemble pour chaque œil) sera nécessaire.

#### **Basculement attentionnel :**

Les restitueurs vidéo transparents acquièrent l'environnement réel de l'utilisateur par une ou des caméras pour les retransmettre sur un ou des écrans occlusifs. De cette manière, l'environnement réel est numérisé et des traitements vidéos peuvent être effectués. Par conséquent, l'alignement précis d'informations virtuelles sur les référents réel est possible, ainsi que donner l'impression à l'utilisateur que les deux types d'informations se situent à la même distance. Ainsi, on évite la séparation en deux espaces perceptifs distincts, ce qui réduit le

risque de tunnel cognitif et donc réduit la charge mentale générée par le basculement attentionnel induit. C'est le principal avantage des reconstituteurs vidéo transparents.

**Compatibilité avec les équipements :**

Les systèmes vidéo transparents peuvent être intégrés aux systèmes de vision nocturne du fantassin ou tout autre système d'amélioration des capacités visuelles.

**Usage collaboratif :**

A l'exception des HMD, les reconstituteurs vidéo transparents sont consultables par plusieurs utilisateurs simultanément car contrairement aux systèmes optiques transparents, les informations perçues ne dépendent pas du point de vue de l'utilisateur (dans la limite des angles de vision de l'écran).

**Détection de cible :**

Comme ces systèmes peuvent afficher des informations de conformalité, ils peuvent être utilisés pour des tâches de détection de cibles.

**A1.3.2.2 Inconvénients**

**Maturité et coût :**

Des reconstituteurs vidéos transparents HHD sont généralement peu coûteux, et déjà disponibles sur le marché (PDA ou téléphone portable avec caméra intégrée). Cependant, les HMD vidéo see-through sont les plus chers, les plus complexes et les moins matures technologiquement.

Le problème principal vient de la complexité de traitement du système. Compte tenu de la numérisation de l'environnement réel et des informations additionnelles, les temps de calculs nécessaires sont encore excessivement longs et très coûteux en ressources.

**Taille et poids :**

Ces systèmes sont généralement plus lourds que leurs homologues optiques ou immersifs. De plus, compte tenu du nombre de composants, ils sont aussi plus encombrants.

**Consommation d'énergie :**

Ce sont les systèmes qui consomment le plus d'énergie car tout est traité numériquement. De plus, certains systèmes (HMD vidéo see-through binoculaire) possèdent deux caméras et plusieurs écrans, qui sont les composants nécessitant le plus d'énergie. L'autonomie se trouve donc bien inférieure à celle d'un système HMD optique see-through.

**Luminance :**

Des filtres dynamiques de luminosité sont requis pour compenser les variations de luminosité ambiante et pour faciliter la perception de l'utilisateur par haute et basse luminosité. Ces filtres

rajoutent encore des traitements supplémentaires et donc augmentent la latence générale du système.

**Troubles proprioceptifs :**

Le problème majeur de la latence et du faible taux de rafraîchissement de l'affichage de l'environnement réel de l'utilisateur peut induire des problèmes perceptifs et proprioceptifs tels que des troubles de l'équilibre et de l'orientation, des nausées et le mal du simulateur. La latence entre la production d'un mouvement et le feedback visuel impacte les processus neurocognitifs visuo-vestibulaires impliqués dans la gestion de la motricité. C'est l'inconvénient majeur des HMD vidéo see-through.

**Occlusion visuelle :**

En raison de la capacité de ce type de système à afficher des informations virtuelles complètement opaques, il y a un risque important d'occulter des éléments de l'environnement réel. Par ailleurs, lorsqu'il est éteint, l'utilisateur a besoin de retirer ce type de restituteur de son champ de vision, afin de percevoir l'environnement réel.

**Visibilité et lisibilité :**

La couleur des éléments présents dans l'environnement réel peut dégrader la lisibilité des informations affichées. Par conséquent, certains types de police de caractères alphanumériques seront inutilisables. Par ailleurs, la résolution des écrans étant bien moindre que celle (théorique) de l'œil humain, il peut y avoir un phénomène de pixellisation sur les éléments les plus distants de l'environnement réel.

**Usage en mobilité :**

Comme décrit précédemment, la latence et le faible taux d'images par seconde peuvent gravement impacter les capacités motrices des utilisateurs. Par conséquent, l'utilisation des HMD vidéo see-through sera vite limitée en situation de forte mobilité.

### **A1.3.3 Analyse des restituteurs immersifs**

#### **A1.3.3.1 Avantages**

**Maturité et coût :**

Les restituteurs immersifs ou occlusifs sont ceux qui sont les plus répandus et les moins chers.

**Robustesse :**

Les restituteurs immersifs sont plus robustes car ils n'ont pas d'éléments optiques fragiles exposés.

**Taille et poids :**

Dans le cas des HMD, les reconstituteurs immersifs sont plus légers que les vidéos see-through ainsi que certains optical see-through.

**Contraste/couleurs/luminance :**

Les reconstituteurs immersifs sont ceux qui ont les meilleures performances graphiques car ils n'ont pas les contraintes des écrans transparents. Les couleurs, le contraste et la résolution en font les reconstituteurs les plus lisibles.

**Champ de vision augmenté :**

Dans le cas des HMD, les reconstituteurs immersifs offrent des champs de vision plus importants que ceux des optical see-through.

**Texte et symbologie :**

Grâce à leurs excellentes performances graphiques, ces systèmes permettent d'afficher les textes et symbologies les plus riches et les plus nettes.

**Vidéo et IHM complexe :**

Les reconstituteurs immersifs sont les plus adaptés pour afficher de la vidéo ou des IHM graphiques complexes.

**Visibilité et lisibilité :**

Pour toutes les raisons citées précédemment, ce sont les reconstituteurs offrant la meilleure lisibilité et visibilité.

**Usage collaboratif :**

A l'exception des HMD, plusieurs utilisateurs peuvent consulter simultanément les informations affichées sur ce type de reconstituteur.

**A1.3.3.2 Inconvénients**

**Conformalité :**

Les reconstituteurs immersifs ne permettent pas d'afficher des informations de conformité dans l'environnement réel proche de l'utilisateur, mais peuvent afficher des informations augmentées sur le flux vidéo d'un environnement distant filmé par une caméra embarquée sur un drone ou un robot par exemple.

**Troubles proprioceptifs :**

L'utilisation des HMD immersifs peut empêcher l'utilisateur de maintenir un contact visuel avec son environnement réel et il peut donc avoir un conflit avec les informations vestibulaires. Ce conflit peut provoquer les symptômes du mal des transports (nausée, vertige, perte d'équilibre).

**Occlusion visuelle :**

Le principal inconvénient des reconstituteurs immersifs est que l'utilisateur ne peut pas percevoir son environnement réel en même temps qu'il consulte les informations affichées.

**Gêne physique :**

Pour pouvoir percevoir l'environnement réel, l'utilisateur doit donc manuellement enlever le reconstituteur immersif (HMD ou HHD) de son champ de vision.

**Mouvement de la tête et des yeux :**

Comme décrit précédemment, l'utilisateur ne peut pas percevoir son environnement et les informations affichées simultanément, il doit donc effectuer des mouvements alternatifs du corps, de la tête et/ou des yeux pour consulter soit son reconstituteur, soit l'environnement réel.

**Usage nocturne :**

Les reconstituteurs immersifs ne sont pas efficaces en usage nocturne. La luminosité nettement supérieure de l'écran par rapport à la luminosité ambiante provoque la contraction des pupilles de l'utilisateur, ce qui interfère avec la vision nocturne.

**Usage en mobilité :**

Les soldats ne peuvent pas se déplacer en utilisant un HMD immersif car ils ne peuvent percevoir leur environnement. Il est même dangereux de le faire car l'utilisateur ne pourra pas détecter la présence d'obstacles sur son chemin et risquerait de chuter. Dans le cas des HHD immersifs, le risque est moins important, mais le tunnel cognitif induit par le traitement des informations affichées, détourne l'attention de l'utilisateur de son environnement.

# ANNEXE 2 - PLAN D'ÉVALUATION ERGONOMIQUE DE SYSTÈMES DE RA

---

## A2.1 OBJECTIFS

Ce document présente les méthodes, critères et métriques spécifiques à utiliser pour évaluer un système de réalité augmentée pour le fantassin. Afin d'être les plus pertinentes possibles, les méthodes d'évaluation doivent tenir compte du type de matériel à évaluer, ainsi que des contextes d'usage spécifiques de chaque système. Cependant, compte tenu de l'objectif de ce document (être applicable à n'importe quel système de Réalité Augmentée), ce plan d'évaluation doit donc être adapté selon le type de matériel et les scénarios d'usage spécifiques à chaque système.

Bien que les travaux menés en Réalité Augmentée (RA) datent de plus d'une quarantaine d'années, les évaluations documentées de ces systèmes sont beaucoup plus récentes. Swan et Gabbard (2005) ont réalisé un état de l'art qui montre que sur un total de 266 articles publiés sur le thème de la RA, seulement 38 (environ 14%) portaient sur des aspects de l'interaction homme-machine, et seulement 21 (environ 8%) décrivaient une méthode d'évaluation utilisateur.

Les études d'utilisabilité concernent généralement les domaines suivants :

1. **La perception** : Il s'agit ici d'étudier des tâches de « bas niveau » ou tâches « élémentaires » avec l'objectif de comprendre la perception et la cognition dans des contextes de RA (Swan & Gabbard, 2005).
2. **Les performances** : Il s'agit ici de mesurer les performances des utilisateurs de systèmes de RA, afin d'avoir une idée de l'impact de ces systèmes sur les tâches utilisateurs (Swan & Gabbard, 2005).
3. **La collaboration** : Il s'agit ici d'étudier la collaboration entre utilisateurs de systèmes de RA (Swan & Gabbard, 2005).
4. **L'utilisabilité de l'interface ou du système** : Il s'agit ici de « mesurer » l'utilisabilité du système de RA. Les études de cette catégorie peuvent chevaucher celles de la deuxième catégorie, bien qu'elles ne s'intéressent pas forcément aux performances des utilisateurs (Dünser, Grasset, & Billinghamurst, 2008).

Dans le domaine de la RA, les études d'évaluation avec utilisateurs peuvent être classifiées selon les approches ou méthodes mises en œuvre. Il est ainsi possible de les regrouper sous cinq catégories :

1. Les mesures objectives

2. Les mesures subjectives
3. Les analyses qualitatives
4. Les évaluations informelles
5. Les techniques d'évaluation de l'utilisabilité

Notons au passage que les mesures objectives, subjectives et qualitatives peuvent être réalisées lors des tests utilisateurs.

Les catégories précédentes concernent l'usage des systèmes interactifs. Toutefois, les dispositifs techniques peuvent aussi être évalués du point de vue ergonomique et, ce, sans usage. Il s'agit ici d'appliquer des dimensions, critères et/ou recommandations ergonomiques issus d'études empiriques, comme dans les méthodes d'inspection des systèmes interactifs. En d'autres termes, les systèmes et dispositifs techniques peuvent être évalués et comparés sur la base de dimensions « ergonomiques ». Par exemple, le poids d'un dispositif de RA peut facilement être mesuré et comparé aux recommandations ergonomiques relatives au port de charge sur la tête. Par ailleurs, les caractéristiques optiques de certains dispositifs peuvent aussi être évaluées de façon à déterminer par exemple si le champ visuel sera suffisant... L'évaluation des dispositifs techniques, du point de vue ergonomique, doit donc aussi faire partie des méthodologies d'évaluation, au côté des méthodes axées sur les aspects d'utilisation.

## **A2.2 METHODOLOGIE**

Les sections suivantes présentent les méthodes et mesures appliquées aux systèmes de RA. De plus, nous avons repris les 5 groupes précédents, mais les avons organisés autour d'une classification « habituelle » des méthodes d'évaluation ergonomique à savoir les méthodes d'inspection et les tests utilisateurs.

### **A2.2.1 Les méthodes et techniques d'évaluation de l'utilisabilité**

On trouve dans cette catégorie les études faisant appel aux méthodes « classiques » de l'évaluation ergonomique des systèmes interactifs traditionnels : l'inspection ergonomique (évaluation heuristique, inspection experte) et les tests utilisateur ou test d'usage (utilisant ou non certaines techniques comme la méthode du « *think aloud* », la méthode du magicien d'Oz, etc). Chacune des méthodes présentées ci-après permet de fournir, suite à l'évaluation, un livrable ayant une forme spécifique. Pour chacune des méthodes présentées, des indications sur la forme que peut prendre un livrable sont données.

## A2.2.2 Les méthodes d'inspection

Les méthodes d'inspection de l'utilisabilité (*usability inspection methods*) regroupent un ensemble d'approches faisant appel au jugement d'évaluateurs. Bien que toutes ces méthodes aient des objectifs différents, elles visent généralement la détection des aspects des interfaces pouvant entraîner des difficultés d'utilisation ou alourdir le travail des utilisateurs.

Parmi les méthodes d'inspection, celles qui sont le plus utilisées sont : l'analyse de la conformité à un ensemble de recommandations (*guideline reviews*), l'analyse de la conformité à des normes lorsqu'elles existent (*standards inspection*), l'utilisation d'heuristiques (*heuristic evaluation*) et de *Critères Ergonomiques*.

<hr/> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Guidage               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. Incitation*</li> <li>1.2. Groupement/Distinction entre Items                   <ol style="list-style-type: none"> <li>1.2.1. Groupement/Distinction par la Localisation*</li> <li>1.2.2. Groupement/Distinction par le Format*</li> </ol> </li> <li>1.3. Feedback Immédiat*</li> <li>1.4. Lisibilité*</li> </ol> </li> <li>2. Charge de Travail               <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. Brièveté                   <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1.1. Concision*</li> <li>2.1.2. Actions Minimales*</li> </ol> </li> <li>2.2. Densité Informationnelle*</li> </ol> </li> <li>3. Contrôle Explicite               <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1. Actions Explicites*</li> <li>3.2. Contrôle Utilisateur*</li> </ol> </li> <li>4. Adaptabilité               <ol style="list-style-type: none"> <li>4.1. Flexibilité*</li> <li>4.2. Prise en Compte de l'Expérience de l'Utilisateur*</li> </ol> </li> <li>5. Gestion des Erreurs               <ol style="list-style-type: none"> <li>5.1. Protection Contre les Erreurs*</li> <li>5.2. Qualité des Messages d'Erreur*</li> <li>5.3. Correction des Erreurs*</li> </ol> </li> <li>6. Homogénéité/Cohérence*</li> <li>7. Signifiante des Codes et Dénominations*</li> <li>8. Compatibilité*</li> </ol> <hr/>	<hr/> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Compatibilité *</li> <li>2 Guidage               <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 Lisibilité *</li> <li>2.2 Incitation *</li> <li>2.3 Groupement/Distinction entre items                   <ol style="list-style-type: none"> <li>2.3.1 Groupement/Distinction par la localisation *</li> <li>2.3.2 Groupement/Distinction par le format *</li> <li>2.3.3 Groupement/Distinction par le comportement *</li> </ol> </li> <li>2.4 Feed-back immédiat *</li> </ol> </li> <li>3 Contrôle explicite               <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 Actions explicites *</li> <li>3.2 Contrôle utilisateur *</li> </ol> </li> <li>4 Signifiante des codes, dénominations et comportements *</li> <li>5 Charge de travail               <ol style="list-style-type: none"> <li>5.1 Charge physique *</li> <li>5.2 Brièveté                   <ol style="list-style-type: none"> <li>5.2.1 Actions minimales *</li> <li>5.2.2 Concision *</li> </ol> </li> <li>5.3 Densité informationnelle *</li> </ol> </li> <li>6 Adaptabilité               <ol style="list-style-type: none"> <li>6.1 Prise en compte de l'expérience de l'utilisateur *</li> <li>6.2 Flexibilité *</li> </ol> </li> <li>7 Homogénéité/Cohérence *</li> <li>8 Gestion des erreurs               <ol style="list-style-type: none"> <li>8.1 Protection contre les erreurs *</li> <li>8.2 Qualité des messages d'erreur *</li> <li>8.3 Correction des erreurs *</li> </ol> </li> </ol> <p style="text-align: center;">(Les C.E. élémentaires sont dotés d'une astérisque)</p> <hr/>
--	---

Figure 66. Critères Ergonomiques de Scapin & Bastien (1997) pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs à gauche, et Critères de Bach & Scapin (2003) pour les environnements virtuels à droite.

Dans le domaine de la RA, de la réalité mixte et de la réalité virtuelle, les chercheurs ont adapté les dimensions, normes et recommandations développées pour les systèmes interactifs « traditionnels ». À titre d'exemple, les critères de Scapin et Bastien (1997) qui ont été développés dans les années '90 ont été étendus au Web (Leulier, Bastien, & Scapin, 1998), puis aux systèmes de réalité virtuelle (Bach & Scapin, 2003, 2005). La deuxième liste se distingue (voir Figure 66) de celle de gauche de la façon suivante : la définition des critères « *Signifiante des Codes et Dénominations* » a été modifiée pour inclure les aspects « *Comportements* ».

Les auteurs ont créé 2 nouveaux critères (*Groupement/Distinction par le comportement et Charge Physique*). De plus, les 20 critères ont été ordonnés selon un ordre hypothétique basé sur une stratégie d'inspection (alors que les critères précédents étaient simplement ordonnés en fonction du nombre de recommandations qui leur étaient affectées). Bien évidemment, chaque critère est accompagné, dans les textes des auteurs, d'une définition et d'exemples de recommandations.

D'autres auteurs ont aussi proposé des dimensions pour la conception et l'évaluation de systèmes de RA et de RV. C'est le cas par exemple de Sutcliffe et Gault (2004) (voir Tableau 26). Bien que cette liste d'heuristiques ait été développée pour les systèmes de réalité virtuelle, il conviendrait de déterminer leur degré de pertinence pour les systèmes de RA.

**Engagement naturel.** Le mode d'interaction doit être le plus proche possible du mode d'interaction attendu par l'utilisateur en situation naturelle. Idéalement, l'utilisateur ne devrait pas se rendre compte que la réalité est virtuelle. Cet état de fait dépendra du caractère naturel de cette interaction et du sentiment d'engagement et de présence vécus par l'utilisateur.

**Compatibilité avec les tâches et domaine de l'utilisateur.** L'Environnement Virtuel (EV) et le comportement des objets doivent correspondre le plus possible aux attentes des utilisateurs concernant les objets réels ; leurs comportements ; leur caractère affordant pour les actions liées aux tâches.

**Expression naturelle des actions.** La représentation de soi et de sa présence dans un EV doit permettre à l'utilisateur d'agir et d'explorer naturellement cet environnement et ne doit pas restreindre les actions physiques naturelles. La qualité des EV peut être limitée par les dispositifs disponibles. Par exemple, si le retour haptique n'est pas possible, les interactions ne peuvent être complètement « naturelles ».

**Coordination étroite des actions et représentations.** La représentation de soi, de sa présence et de ses comportements dans un EV doit être fidèle aux comportements de l'utilisateur. Les temps de réponse du système par rapport aux comportements de l'utilisateur devraient être inférieurs à 200 ms afin d'éviter les problèmes du mal des transports (*motion sickness*).

**Feedback réaliste.** Les effets des actions de l'utilisateur sur les objets virtuels doivent être immédiatement visibles et conformes aux lois de la physique et aux attentes perceptives de l'utilisateur.

**Points de vue fidèles.** La représentation visuelle du monde virtuel devrait correspondre à la perception normale de l'utilisateur. Les changements de points de vue associés aux mouvements de la tête devraient suivre ces derniers sans délais.

**Aide à la navigation et à l'orientation.** L'utilisateur devrait toujours pouvoir savoir où il se trouve dans l'environnement virtuel, et pouvoir retourner à des positions connues ou

identifiées. Les actions et/ou comportements « surnaturels » telles que voler au-dessus des bâtiments ou traverser des surfaces peuvent constituer des aides au déplacement, mais ces possibilités doivent être évaluées par rapport au caractère naturel des interactions (recommandations 1 et 2). Un compromis doit être trouvé.

**Entrées et sorties clairement identifiées.** Les moyens permettant d'entrer et de sortir d'un EV doivent être clairement indiqués/communiqués.

**Exceptions ou dérogations.** Lorsque des compromis de conception sont faits, ils devraient être appliqués de façon cohérente et clairement indiqués, comme par exemple des substitutions intermodales ou des actions spécifiques (ou « surnaturelles ») pour la navigation.

**Aide à l'apprentissage.** Les objets « actifs » devraient être clairement indiqués et, si nécessaire, devraient pouvoir être accompagnés d'explication pour faciliter leur apprentissage.

**Initiative du contrôle clairement indiquée.** Lorsque le système prend le contrôle des interactions, cet état devrait être clairement indiqué ainsi que les conditions permettant à l'utilisateur de reprendre ce contrôle.

**Sentiment de présence.** La perception d'engagement (implication) et l'impression d'être dans un environnement « réel » devraient être le plus naturel possible.

Tableau 26. Heuristiques de Sutcliffe et Gault (2004) pour l'évaluation des systèmes de réalité virtuelle.

Nous devons noter au passage que les listes de critères et d'heuristiques diffèrent par leur mode d'élaboration : certaines listes sont élaborées à partir de revues de littérature, d'autres à partir de jugements d'experts sur ce qui constitue une bonne interface, d'autres à partir d'une démarche *top down*, c'est-à-dire à partir de théories sur le comportement humain...

Un autre aspect à considérer lorsqu'on aborde l'évaluation à partir de ces listes de critères est la connaissance préalable que doivent avoir les évaluateurs pour pouvoir réaliser de bonnes évaluations. Il s'agit, dans la mesure du possible, d'identifier tous les choix de conception contraires aux recommandations, en d'autres termes les vrais défauts de conception (de vraies détections), et de ne pas identifier de bons choix de conception comme étant des erreurs au regard des critères, en d'autres termes considérer de bons choix de conception comme des défauts de conception (fausses détections). Quoi qu'il en soit, les critères permettent d'organiser et classer les recommandations ergonomiques pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs quels qu'ils soient.

Les travaux de Gabbard (2001) ont porté en bonne partie sur les recommandations pour la conception et l'évaluation des systèmes de RA. Gabbard a organisé les recommandations à l'aide des 4 axes suivants. Chaque axe se décompose ensuite en sous niveaux, puis des

recommandations sont fournies. Le texte qui suit présente les 4 axes et donne des exemples de recommandations pour certains sous niveaux.

## 1. Les tâches utilisateurs et les utilisateurs (*Users and User Tasks*)

- a. Utilisateurs
  - i. « Lors de tests de systèmes de RA (comme pour ceux utilisés à des fins de recherche), les méthodes de calibration devraient être spécifiques aux participants. En d'autres termes, la calibration devrait tenir compte des différences individuelles. »
  - ii. « Fournir des accès aux informations relatives aux autres collaborateurs lorsque ces derniers sont physiquement non visibles ou « délocalisés ».
  - iii. ...
- b. Tâches
  - i. « Concevoir les méthodes et mécanismes d'interaction de façon à faciliter la réalisation des tâches séquentielles ainsi que l'ordonnement des sous tâches. »
  - ii. « Faciliter l'exécution de tâches concurrentes et le traitement cognitif des utilisateurs. »
  - iii. ...
- c. Navigation/locomotion
  - i. « Lorsqu'appropriés, fournir des libellés spatiaux, des repères et une boussole »
  - ii. « Fournir des informations permettant aux utilisateurs de toujours pouvoir répondre aux questions : Où suis-je ? Quelle est ma position et mon orientation ? Dans quelle direction et où dois-je aller ? Comment puis-je y aller ? »
  - iii. ...
- d. Sélection d'objets
- e. Manipulation d'objets

## 2. Le modèle virtuel (*The Virtual Model*)

- a. La représentation et la présentation de l'utilisateur (*User Representation and Presentation*)
  - i. « Pour les systèmes de RA sociaux (ex., jeux), les utilisateurs devraient pouvoir créer, présenter et adapter les informations privées et à destination du groupe. »
  - ii. ...
- b. La représentation et la présentation des agents virtuels (*VE Agent Representation and Presentation*)
  - i. « Inclure des agents qui sont pertinents au regard des tâches et objectifs des utilisateurs. »
- c. Décors/alentours et paramètres de l'environnement virtuel (*Virtual Surrounding and Setting*)
  - i. « Fournir aux utilisateurs des indices pertinents relatifs au masquage visuel, en proposant un masquage approprié entre objets réels et virtuels. »
  - ii. « Optimiser la perception visuelle stéréoscopique en présentant des images à l'œil gauche et droit qui contiennent un minimum de disparités verticales. »
  - iii. ...
- d. Informations relatives au système de réalité virtuelle (*VE System and Application Information*)
  - i. « S'efforcer de proposer des interfaces cohérentes d'une application à l'autre »
  - ii. « Lorsque l'on propose des cartes, appliquer les recommandations de Darken et Sibert (1995) »
  - iii. ...

3. **Les mécanismes d'entrée de données (User Interface Input Mechanisms)**
  - a. Pister la position et l'orientation des utilisateurs (*Tracking User Location and Orientation*)
    - i. « Pour les prototypes de systèmes de RA (c'est-à-dire ceux utilisés pour la recherche), les méthodes de calibration devraient être indépendantes les unes des autres. En d'autres termes, les différentes parties du système devraient pouvoir être calibrées indépendamment les unes des autres. »
    - ii. ...
  - b. Les gants de données et la reconnaissance des gestes
    - i. ...
  - c. Reconnaissance vocale et langage naturel
    - i. ...
  
4. **Les éléments de présentation de l'interface (User Interface Presentation Components)**
  - a. Feedback visuel – Présentation graphique
    - i. « Le timing et la réactivité du système de RA sont des éléments cruciaux (ils affectent les performances des utilisateurs). »
    - ii. « S'assurer de la cohérence des indices visuels (et des autres sens) qui sont utilisés pour inférer des informations relatives à la combinaison des mondes virtuels et réels. »
    - iii. « Permettre aux utilisateurs d'optimiser les affichages (ex., permettre aux utilisateurs de contrôler les niveaux de luminance et les contrastes des affichages.) »

**Livrable :** Un livrable peut être fourni pour chaque liste d'items (dimensions / critères / recommandations) sous la forme de tableaux indiquant pour chaque item si ce dernier est applicable dans le cadre de l'inspection et compte tenu de la description des tâches utilisateurs fournie et, le cas échéant, s'il y a adhésion ou non. Certains items pouvant être redondants d'une liste à l'autre, des renvois peuvent être faits. Pour chacun des items, les objets concernés (texte, intitulé, symbole, etc.) peuvent être indiqués et des illustrations fournies. En d'autres termes, pour chacun des items, l'élément du système de RA concerné peut être présenté et illustré.

**Critères d'exigence :** Toute évaluation nécessite de spécifier des critères d'exigences. En d'autres termes, que faire à l'issue d'une inspection ? À partir de quel critère peut-on considérer que le système de RA est satisfaisant ? Un critère d'exigence ne saurait être calculé sur la seule base du nombre d'items satisfaits par rapport au nombre d'items applicables. Aussi, sur la base du livrable, une réunion de consensus peut être organisée afin de statuer, pour chacun des items non satisfaits, sur la nécessité de modifier l'interface. Les tableaux doivent donc comporter une colonne permettant d'indiquer si l'interface doit être modifiée ou non. Dans l'affirmative, les modifications devraient faire l'objet d'une autre validation.

## **A2.2.3 Les tests utilisateurs**

Lors des tests utilisateurs, ou tests d'usage, un ou plusieurs utilisateurs participent à l'exécution de tâches ou scénariis représentatifs de tâches réelles, à l'exploration libre de l'interface ou sont amenés à commenter les interfaces proposées sur la base de scénariis de tests.

On s'intéressera, lors de ces tests, à la fois aux aspects qualitatifs et quantitatifs comme nous le verrons plus bas (ex., indices de performance).

Suite au test, des questionnaires et des entretiens permettent de recueillir des données subjectives relatives aux attitudes, aux opinions et à la satisfaction des utilisateurs. Ces données sont utiles pour compléter les données objectives recueillies lors des tests.

*Avantages* : La méthode des tests utilisateurs est la seule technique permettant d'identifier les difficultés réelles d'utilisation.

*Limites* : Selon la complexité de l'outil, il peut être difficile d'en évaluer tous les aspects. Le nombre d'objectifs de tâche (scénario) à réaliser est nécessairement réduit.

### **A2.2.3.1 Types de tests**

#### *A2.2.3.1.1 Les tests exploratoires*

Réalisés tôt dans le cycle de développement, ils visent plus particulièrement l'efficacité des premiers concepts. Ces premiers tests peuvent être réalisés à l'aide de maquettes (papier, powerpoint,...) ou prototypes (version simplifiée ou scénarisée de tout ou partie d'un système).

#### *A2.2.3.1.2 Les tests d'évaluation*

Ils peuvent être réalisés tôt dans le cycle, mais aussi une fois que la conception détaillée est plus avancée. L'objectif est ici de fournir des données précises sur différents aspects de l'utilisabilité. Ce type de test permet d'identifier les difficultés d'usage lors de l'accomplissement de tâches représentatives de celles pour lesquelles le système a été développé et permet de fournir des données quantitatives sur divers indices de performance (par ex., temps de réalisation des tâches, nombre d'erreurs, efficacité, efficience...).

#### *A2.2.3.1.3 Les tests de validation*

Ils surviennent généralement juste avant la livraison du produit ou tardivement dans le cycle de développement. L'objectif est ici d'évaluer la qualité ergonomique de l'outil en référence à des objectifs d'utilisabilité (par ex. vérifier que 80% des participants peuvent réaliser un scénario de test sans erreur et dans un temps donné).

#### A2.2.3.1.4 Les tests de comparaison

Ce type de test n'est pas associé à une étape spécifique du cycle de développement d'un outil. L'objectif est ici de comparer des alternatives de conception concernant un même service ou un même produit, ou de comparer des produits différents proposant les mêmes services ou les mêmes fonctionnalités. Ces tests comparatifs s'appuient souvent sur une étude comparative préalable (Benchmark ergonomique) d'outils pertinents sélectionnés.

#### A2.2.3.2 Les mesures objectives

Les mesures objectives, dont il est question dans les études de cette catégorie, sont :

- *La réussite des scénariis* : Pour déterminer si les participants à un test utilisateur ont réussi un scénario, les critères de succès ou de réussite doivent être clairement définis. Pour chaque participant et chaque scénario, cet indice prendra la valeur de « 0 » (échec) ou « 1 » (réussite). Dans certains cas, le succès à un scénario ne sera que partiel. Les indicateurs de performance doivent donc permettre d'indiquer si les participants ont réussi leurs tâches avec ou sans assistance, ou si leurs réussites « partielles » ont été réalisées avec ou sans assistance. Pour chacun des scénariis, un pourcentage de réussite doit donc être calculé.
- *Le temps pour compléter une tâche* : Les objectifs de performance, en ce qui concerne le temps de référence pour la réalisation des tâches, ne peuvent être déterminés a priori. Par conséquent, une estimation des temps de réalisation devra être fournie, pour chacune des tâches, sur la base de simulations réalisées par des personnes de référence ou à l'occasion de pré-tests. Ce temps escompté servira ensuite de base de référence et les écarts à cette référence pourront être calculés (distribution des temps de réalisation des tâches). Quoiqu'il en soit, pour chaque tâche, les statistiques descriptives suivantes doivent être fournies en plus des temps individuels : temps moyen, médiane, moyenne géométrique, valeur minimum, valeur maximum, intervalle de confiance. En plus des mesures de temps, les questions suivantes peuvent être posées après chacune des tâches :

Comment évalueriez-vous le degré de difficulté de la tâche que vous venez de compléter ? Cette tâche était-elle difficile ou facile ?

<b>Très difficile</b>					<b>Très facile</b>
1	2	3	4	5	

L'état actuel du système est-il satisfaisant pour réaliser la tâche que vous venez d'effectuer ?

<b>Très insatisfaisant</b>					<b>Très satisfaisant</b>	
1	2	3	4	5		

D'après vous, le temps que vous avez mis pour compléter cette tâche est :

<b>Beaucoup trop long</b>					<b>Tout à fait satisfaisant</b>	
1	2	3	4	5		

- *Le taux d'erreurs* : Afin d'identifier le nombre d'erreurs commises par les participants, les tâches devant être réalisées doivent être décomposées en actions élémentaires. En d'autres termes, pour chacune des tâches, une description détaillée des actions des utilisateurs nécessaires à leur réalisation doit être fournie. Chacune de ces actions constitue une occasion potentielle d'erreurs (« opportunités »). Ainsi, si une tâche donnée se décompose en 8 actions utilisateurs, et que 20 participants doivent la réaliser, nous avons 160 opportunités d'erreurs. Si nous observons au total 40 erreurs, nous avons un taux d'erreurs de  $(40/(8 \times 20) \times 100) = 25\%$ . Le niveau de qualité est donc de 75%.
- *Les verbalisations spontanées* : Bien qu'il ne s'agisse pas ici d'indicateurs de performances au sens strict, les verbalisations spontanées doivent être consignées. Par conséquent, tous les commentaires émis de façon spontanée par les participants aux tests utilisateurs devront faire l'objet d'une compilation et d'une analyse. Un tableau récapitulatif peut accompagner le rapport des tests utilisateurs.
  - La précision des réponses,
  - Des scores,
  - Des positions,
  - Le nombre d'actions,
  - La reconnaissance ou non des objets,
  - L'estimation des distances,
  - Etc.

En général, ces mesures font l'objet de traitements statistiques. Certaines mesures, comme par exemple le nombre d'objets reconnus ou encore l'exactitude de la distance estimée, sont directement liées aux objectifs du système de RA conçu. Par conséquent la liste des mesures ne saurait être exhaustive. Ces mesures doivent être précisées en fonction des scénariis de tests envisagés.

**Critères d'exigence :** Les mesures objectives sont généralement effectuées auprès de plusieurs participants. Les performances des participants pouvant être variables, des critères d'exigences doivent être définis. Ces critères, s'ils servent à décider des mesures à prendre, telles que modifications des matériels et/ou modifications des logiciels, doivent être définis sur la base de données de référence et en accord avec le client. Ces critères peuvent cependant être modifiés en fonction des résultats obtenus : en effet et compte tenu des spécificités du contexte, des critères d'exigences peuvent avoir été définis de façon trop laxiste ou trop rigoureuse. Par exemple, on peut poser comme exigence que 80% des participants réussissent un scénario donné dans une limite de temps donné. Toutefois, après le test, les expérimentateurs peuvent se rendre compte que la limite de temps est trop courte et irréaliste. Par conséquent, dans ces situations les critères d'exigence peuvent être revus. Quoiqu'il en soit, un niveau de qualité peut être calculé grâce à la formule suivante :  $1 - (\text{nombre d'échecs} / \text{nombre d'essais})$ . Ce niveau de qualité peut être défini comme étant égal ou supérieur à 80% par exemple. Dans les cas où un scénario entraînerait un niveau de qualité inférieur à 80%, l'analyse des échecs, c'est-à-dire des enregistrements vidéo correspondants devra permettre de proposer des aménagements de l'interface. Ces aménagements pourraient être validés par de nouveaux tests avec d'autres participants. En plus des taux de réussite par tâche, des indices de réussite par participants peuvent aussi être fournis.

### **A2.2.3.3 Les mesures subjectives**

Les mesures subjectives sont généralement réalisées à l'aide :

- de questionnaires,
- d'évaluations utilisateurs subjectives,
- ou de jugements.

Ces mesures sont généralement effectuées à l'issue d'une session de tests. Ces questionnaires, qui peuvent prendre la forme d'un guide d'entretien, permettent d'obtenir des informations complémentaires sur des aspects, tels que l'attrait visuel, l'efficacité perçue, l'utilité du système, la crédibilité, etc. Ces questionnaires compléteront les questionnaires de satisfaction.

Les questionnaires de satisfaction sont utilisés depuis longtemps dans le cadre des logiciels interactifs « traditionnels ». Bien que les items de la plupart d'entre eux soient toujours d'actualité (ex : *QUIS - Questionnaire for User Interface Satisfaction*, *PUEU - Perceived Usefulness and Ease of Use*, *NAU - Nielsen's Attributes of Usability*, *NHE - Nielsen's Heuristic Evaluation*, *CSUQ - Computer System Usability Questionnaire*, *ASQ - After Scenario Questionnaire*, *PHUE - Practical Heuristics for Usability Evaluation*, *PUTQ - Purdue Usability Testing Questionnaire*), un questionnaire de satisfaction spécifique pour les systèmes de RA se fait toujours attendre.

**Critères d'exigence :** La plupart des questionnaires de satisfaction utilise des échelles de Likert en 5 ou 7 points. Dans le cas des échelles en 5 points, le score moyen devra être égal ou supérieur à 4. Pour les échelles en 7 points, le score moyen devra être égal ou supérieur à 5,6. Les réponses à chacune des questions, données ordinales, peuvent être traitées comme s'il s'agissait de données continues. Si les scores moyens s'avèrent inférieurs au critère d'exigence, des actions doivent être entreprises pour les augmenter. Une analyse fine des réponses et des entretiens avec les utilisateurs doit être envisagée.

Ces mesures font aussi l'objet de traitements statistiques ou de simples analyses descriptives. Comme pour les mesures objectives, les mesures subjectives sont aussi utilisées lors des tests utilisateurs.

#### **A2.2.3.4 Les analyses qualitatives**

Dans cette catégorie, on trouve des observations d'utilisateurs éventuellement complétées par des entretiens. Les observations des comportements mettent en œuvre des grilles de codage des comportements moteurs (gestes) ou verbaux (commentaires) des utilisateurs.

#### **A2.2.3.5 Le protocole de test**

Le protocole de test désigne la façon dont le test sera conduit, les conditions dans lesquelles le test sera réalisé, le matériel qui sera utilisé et le nombre de personnes qui participeront au test.

##### **A2.2.3.5.1 Procédure**

Le nombre de participants nécessaires pour obtenir des résultats suffisamment représentatifs, lors des tests utilisateurs d'applications traditionnels, est au minimum de 8 par groupe homogène d'utilisateurs. Dans le cadre des tests utilisateurs de systèmes de RA, ce nombre devra être défini en fonction des objectifs de généralisation des résultats tout en prenant en compte les contraintes liées à la sélection des participants. En effet, dans le cadre des tests réalisés chez SAGEM, la population des utilisateurs est « experte ». Ces tests ne sauraient être réalisés avec des populations de non experts, du moins s'agissant des tests réalisés à partir de scénariis opérationnels. Aussi, les utilisateurs devront être choisis en respectant les caractéristiques des utilisateurs cibles.

Quoiqu'il en soit, le nombre et les caractéristiques des participants devront être précisés.

##### **A2.2.3.5.2 Matériel**

Les tests utilisateurs se déroulent généralement dans des environnements permettant l'enregistrement des comportements des utilisateurs. Dans les études qui nous concernent, les tests des systèmes de RA seront réalisés dans des conditions se rapprochant autant que possible des situations de référence. Dans ces contextes, l'usage d'outils d'enregistrements des comportements pose un certain nombre de problèmes. En effet, il est difficilement envisageable d'équiper les participants de matériels d'enregistrements lourds et encombrants.

Les matériels et dispositifs d'enregistrement seront sans doute déportés. Quoiqu'il en soit, le matériel qui sera utilisé pour les tests devra être clairement décrit.

**Livrable** : Le livrable issu des tests utilisateurs doit fournir les informations sur :

- la définition des objectifs du test,
- les caractéristiques des participants (statistiques descriptives : âge, sexe, expérience des outils de communication, statut socioprofessionnel, etc.) et les procédures de recrutement,
- le cas échéant, la segmentation des participants (par groupe),
- les fonctionnalités à tester et les objectifs de tâches utilisateurs (nature des scénarios et nombre de scénarios à réaliser),
- les consignes qui sont données aux utilisateurs,
- les tâches qu'ils devront accomplir, l'ordre dans lequel les tâches doivent être réalisées (le cas échéant les procédures de contrebalancement),
- une description du contexte où sont réalisés les tests, les matériel et logiciels d'enregistrement (ordinateur {système d'exploitation, résolution de l'écran, navigateur, etc .. caméras, webcam, micro, etc.) ainsi que les outils d'analyse qui sont utilisés,
- la phase de prise en main des dispositifs ou des prototypes (si nécessaire),
- le déroulement du test (ex., groupes, protocole expérimental (intra-, inter-participants, variables indépendantes et dépendantes),
- les indices comportementaux devant être enregistrés (ex., nombre d'erreurs, temps nécessaire à la réalisation des scénarios, etc.),
- la grille d'observation (pour codage en direct de certains comportements observés) et de codage des enregistrements vidéo,
- le questionnaire pré-test relatif aux usages actuels de technologies de communication,
- les questionnaires de satisfaction qui seront administrés aux participants et le cas échéant la description du guide d'entretiens,
- le matériel de test (dispositifs utilisés par les participants) et d'enregistrement des comportements (caméscope, logiciels de capture d'événements utilisateurs, etc.),
- les traitements statistiques qui seront réalisés sur les données brutes,
- la description du personnel qui réalisera le test (accompagné de Curriculum Vitae).

Il s'agit en d'autres termes d'indiquer ici, où, comment et par qui les tests sont réalisés.

**Critères d'exigence** : Le livrable doit présenter les informations demandées plus haut et avoir été validé par le client pour que les tests puissent être mis en place.

### **A2.2.3.6 Rapport de tests utilisateurs et présentation des résultats**

Le rapport de test utilisateur permet de décrire les choix de conception ayant entraîné des difficultés d'usage, d'apprentissage ou ayant alourdi le travail. Le rapport de tests sera fourni notamment en tenant compte du « *Common Industry Format* » (CIF)<sup>1</sup> et des indications données dans les sections relatives aux indices de performance.

Ce format précise notamment les points qui doivent être abordés dans les rapports de tests utilisateurs. Ils reprennent d'ailleurs les éléments précisés dans la section « Protocole de test » et les suivants :

- un résumé synthétique,
- une introduction,
- les objectifs du test,
- la méthodologie (description des participants et des tâches qui leurs sont proposées, l'environnement de test (matériel et logiciel), le protocole de tests, les procédures,
- les méthodes de recueil de données,
- les techniques d'analyse mises en œuvre,
- les indicateurs de performance et de satisfaction précédents,
- une conclusion.

Ce rapport constitue le livrable.

---

<sup>1</sup> <http://zing.ncsl.nist.gov/iusr/>

## A2.3 CRITERES ET METRIQUES D'EVALUATION DES SYSTEMES DE RA

Cette section présente les aspects qui devront être étudiés afin d'évaluer un système de réalité augmentée. Cette liste n'a pas de caractère chronologique, ni hiérarchique. Les méthodes d'évaluation à appliquer pourront intégrer plusieurs critères de différentes catégories sans nécessairement respecter l'ordre de cette liste.

Un système de réalité augmentée (comme toute autre IHM) peut être abordé selon deux aspects : matériel et IHM logicielle.

Ces deux facettes de l'interface sont fortement interdépendantes, mais possèdent des aspects qui peuvent être évalués séparément. Afin d'évaluer ou de comparer un système à une autre solution, plusieurs catégories de critères doivent être prises en compte. Le tableau ci-après indique dans quel chapitre sont décrits les critères des différents aspects.

	<b>Aspects techniques</b>	<b>Aspects physiques</b>	<b>Aspects perceptifs</b>	<b>Aspects cognitifs</b>	<b>Aspects opérationnels</b>
<b>Niveau Matériel</b>	Chapitre 2.1	Chapitre 2.2	Chapitre 2.3	N.A*	Chapitre 2.4
<b>Niveau Logiciel</b>	Chapitre 3.1	N.A*	Chapitre 3.2	Chapitre 3.3	Chapitre 3.4

*N.A\* (Non applicable) : Les aspects cognitifs ne sont étudiés qu'au niveau logiciel du système, à l'inverse des aspects physiques uniquement évalués au niveau matériel des interfaces.*

Dans la suite du plan d'évaluation, les critères d'évaluation de chaque catégorie sont présentés de la façon suivante :

<b>Description</b>	<b>Risques</b>	<b>Gains</b>	<b>Méthodes</b>	<b>Métriques</b>
Présentation de la signification du critère.	Description des conséquences négatives si ce critère est peu ou pas respecté.	Présentation des bénéfices potentiels d'une bonne prise en compte de ce critère.	Présentation des méthodes par lesquelles ce critère peut être évalué.	Description des métriques permettant de mesurer ce critère.

## A2.3.1 Evaluation du système (hardware/interfaces physiques)

### A2.3.1.1 Evaluation technique

#### A2.3.1.1.1 Latence générale

#### A2.3.1.1.2 Latence générale

<b>Description</b>	<p>Le terme de latence désigne, d'une manière générale, le délai entre le moment où une information est envoyée, et celui où elle est reçue. La latence générale du système représente donc le temps s'écoulant entre l'acquisition d'informations par le système (commande utilisateur ou mesure d'un capteur), et la restitution à l'utilisateur de l'action ou l'événement en découlant. Visuellement la latence se caractérise par un retard de restitution de l'information virtuelle sur son référent réel.</p> <p>La latence est très importante dans le cas d'un restituteur vidéo see-through pour lequel l'environnement filmé par une ou deux caméras doit être restitué en temps réel à l'utilisateur. Le moindre retard perceptible entre un mouvement de la tête et la restitution de ce même mouvement peut s'avérer inacceptable suivant le contexte d'utilisation.</p> <p>Dans le cas d'une alerte, le fait que sa restitution subisse une seconde de retard n'a aucun impact sur la sensation visuelle de l'utilisateur, mais peut en avoir un sur l'aspect opérationnel de l'activité.</p>
<b>Risques</b>	<p><b>Fort</b> : Sensation de gêne trop importante pour que le système soit utilisable dans un contexte opérationnel précis.</p> <p><b>Modéré</b> : Sensation légère de gêne pour l'utilisateur pouvant entraîner de la fatigue mais ne remettant pas en cause l'activité.</p> <p><b>Faible</b> : Retard de traitement non impactant visuellement (affichage d'une alerte par exemple)</p>
<b>Gains</b>	Réactivité du système face à l'information, et fluidité de restitution pour l'utilisateur.
<b>Méthodes</b>	<p>Pour mesurer de manière précise la latence du système, on peut évaluer les temps de transfert de manière logicielle. Cependant, la mesure de la latence matérielle (celle d'une dalle LCD par exemple) demande l'emploi d'outils spécifiques.</p> <p>Des tests utilisateurs peuvent être effectués, afin de vérifier qu'aucune latence pouvant entraîner une gêne n'est décelable par l'œil humain.</p> <p>Lorsqu'un phénomène de latence apparaît, il convient d'identifier la cause matérielle.</p>
<b>Métriques</b>	<p><b>Objectives</b> : Temps écoulé en secondes. On considère qu'une latence est acceptable (car non détectable par l'utilisateur) lorsque l'affichage possède une trame de retard. Pour un affichage à 25 Hz (voir critère suivant), on obtient donc une latence limite à 20 ms.</p> <p><b>Subjectives</b> : Impossibilité pour l'œil humain de distinguer l'écart de temps entre deux actions : succès ou échec.</p>

### A2.3.1.1.3 Taux de rafraîchissement

<b>Description</b>	La fréquence d'affichage (ou taux de rafraîchissement) est un critère essentiel dans un système de RA. Il dépend directement du phénomène de persistance rétinienne. En dessous d'un certain temps entre deux images, l'œil ne distingue pas la transition. C'est ce qui confère la fluidité à une vidéo. Le taux de rafraîchissement, comme la latence, est primordial dans le cas d'un restituteur vidéo see-through.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Sensation de gêne trop importante pour que le système soit utilisable dans un contexte opérationnel précis. <b>Modéré</b> : Une fréquence trop faible provoque un effet désagréable de saccades ou de clignotements. <b>Faible</b> : Restitution floue dans le cas de mouvements rapides de la caméra.
<b>Gains</b>	Fluidité dans la restitution des animations ou des vidéos.
<b>Méthodes</b>	Pour obtenir le taux de rafraîchissement d'un restituteur, on peut utiliser une sonde photosensible reliée à un oscilloscope, qui va mesurer le temps que mettent les pixels pour passer du blanc au noir, puis du noir au blanc (on utilise des images de test blanches et noires).
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : exprimé en Hz ou en nombre d'images par seconde ( <i>frame per second</i> – FPS).

### A2.3.1.1.4 Luminance

<b>Description</b>	La luminance maximale du restituteur est un critère majeur. En effet, l'utilisation du restituteur de jour, dans des conditions de luminosité extérieure élevée, dépend directement de la luminance maximale du restituteur.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Il est impossible de lire les informations restituées. <b>Modéré</b> : Les informations sont lisibles, mais l'utilisateur doit forcer son attention, ce qui entraîne une fatigue oculaire.
<b>Gains</b>	Utilisation de jour dans des conditions de luminosité extérieure élevée.
<b>Méthodes</b>	Mesurer la luminance d'un restituteur nécessite l'utilisation d'un banc de test optique. L'ensemble des tests doit être réalisé dans un environnement lumineux faible (salle noire d'un laboratoire optique). Une mire blanche est envoyée vers le restituteur à l'aide d'un ordinateur. Un luminancemètre métrologié (certifié) est aligné sur l'axe optique et focalisé sur la pupille oculaire du restituteur.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : exprimé en Cd/m <sup>2</sup> ou en FL.

### A2.3.1.1.5 Champ de vision augmenté

<b>Description</b>	Le champ de vision (ou <i>Field Of View</i> – FOV) restitué peut être directement lié à la caméra utilisée dans le cas d'un HHD ou d'un système vidéo see-through, ou bien au restituteur lui-même. Il faut distinguer deux cas. Premièrement, celui d'un <i>optical see-through</i> , pour lequel le champ de vision augmenté est partiellement superposé au champ de vision naturel. Deuxièmement, le cas d'un <i>video see-through</i> , pour lequel le seul champ de vision du fantassin est celui restitué, capturé par la ou les caméras.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : (video see-through) Le fantassin se voit restituer un champ de vision trop réduit qui limite d'autant sa connaissance de son environnement (problème de <i>situation awareness</i> ). <b>Modéré</b> : ( <i>optical see-through</i> ) Les informations augmentées ne sont restituées que sur un faible champ de vision, ce qui limite l'intérêt du système.
<b>Gains</b>	Meilleure conscience de la situation ( <i>situation awareness</i> ). Plus grand champ de vision augmenté.
<b>Méthodes</b>	Mesurer le champ de vision restitué nécessite l'utilisation d'un banc de test optique spécifique, ainsi que de mires permettant de mesurer précisément les angles.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : exprimé en degrés.

### A2.3.1.1.6 Précision de la géolocalisation

<b>Description</b>	La position donnée par un système de géolocalisation s'exprime en tenant compte de l'erreur sur la mesure. Dans le cadre d'un système de RA, une géolocalisation précise est primordiale pour faire coïncider spatialement les informations augmentées avec leurs référents réels.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Une erreur importante de positionnement du fantassin peut être sommée à une erreur, potentiellement tout aussi importante, du positionnement d'un référent réel. Ceci conduit à une information augmentée placée dans le champ de vision du fantassin à un endroit totalement incorrect. Si sur de grandes distances l'erreur peut être négligeable, elle est rédhibitoire sur des distances proches. <b>Modéré</b> : Le fantassin ne peut pas faire confiance à son système, ce qui peut entraîner un rejet de sa part.
<b>Gains</b>	Des informations virtuelles correctement alignées sur leurs référents réels.
<b>Méthodes</b>	On réalise des mesures à des lieux dont la position exacte est connue, et on compare ensuite avec la position mesurée par le système de géolocalisation. On obtient ainsi un écart à prendre en considération dans les mesures de positionnement.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : exprimé en mètres.

#### A2.3.1.1.7 Précision de l'orientation

<b>Description</b>	Ce critère définit la précision de l'orientation, pour chacune des 3 directions de l'espace (tangage, roulis, et lacet). L'orientation, comme le positionnement, est un critère primordial dans un système de RA. Elle entre en considération dans l'affichage des informations augmentées.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Identique au positionnement (géolocalisation). <b>Modéré</b> : Identique au positionnement (géolocalisation).
<b>Gains</b>	Identique au positionnement (géolocalisation).
<b>Méthodes</b>	Les tests doivent être effectués avec tout l'équipement du fantassin pour vérifier l'impact de champs magnétiques potentiels sur le magnétomètre mesurant l'orientation absolue par rapport au nord.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : exprimé en degrés.

#### A2.3.1.1.8 Consommation électrique

<b>Description</b>	Ce critère définit la consommation énergétique totale du système. Ceci permet d'en déduire son autonomie suivant la source énergétique associée (batteries ou sources externes).
<b>Risques</b>	<b>Modéré</b> : Une consommation trop importante réduit d'autant l'autonomie du système, et par conséquent la durée de la mission.
<b>Gains</b>	Pour une même source d'énergie, une consommation moindre entraîne une meilleure autonomie.
<b>Méthodes</b>	Utilisation d'un wattmètre.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : exprimé en watts.

#### A2.3.1.1.9 *Encombrement*

<b>Description</b>	L'encombrement du système se caractérise par sa masse et ses dimensions.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Le système ne peut être embarqué sur un fantassin. <b>Modéré</b> : Le système peut être embarqué sur un fantassin, mais ses bénéfices doivent compenser l'encombrement supplémentaire qu'il apporte.
<b>Gains</b>	Un encombrement réduit permet de profiter des avantages du système, sans surcharger d'avantage le fantassin.
<b>Méthodes</b>	Balance pour la masse de chaque élément et pied à coulisse pour les mesures
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : masse exprimée en grammes et dimension en cm.

#### A2.3.1.1.10 *Durcissement et résistance aux conditions environnementales*

<b>Description</b>	Le système doit satisfaire des exigences de durcissement, afin d'être compatibles avec l'activité opérationnelle du fantassin. Afin d'être utilisable par tout temps, le système doit également être étanche et supporter des températures extrêmes.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Le système n'est pas utilisable en conditions opérationnelles. <b>Modéré</b> : Certaines conditions opérationnelles ou environnementales ne sont pas supportées par le système.
<b>Gains</b>	Les avantages opérationnels apportés par le système sont présents quelles que soient les conditions climatiques d'utilisation. De plus, un équipement durci est un gage de confiance et de sûreté pour le fantassin.
<b>Méthodes</b>	On effectue des séries de tests de qualification pour satisfaire des normes de résistance aux chocs, aux vibrations, aux températures extrêmes, à la pluie et à la poussière...
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : normes de certification reconnues.

## **A2.3.1.2 Evaluation ergonomique des aspects physiques**

### **A2.3.1.2.1 Confort de port et/ou d'utilisation**

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas induire de gênes, douleurs ou inconforts lors de son utilisation. Les systèmes de RA doivent pouvoir être portés et utilisés pendant des durées prolongées par les fantassins. Il convient donc d'évaluer leur impact sur différentes durées d'utilisation, afin de déterminer leur niveau de confort à court, moyen et long terme.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Risque de refus d'usage et d'appropriation du système. <b>Modéré</b> : Augmentation de la fatigue physique globale de l'utilisateur.
<b>Gains</b>	Facilite l'appropriation du système et son usage sur des durées prolongées.
<b>Méthodes</b>	Le confort étant une variable subjective, il convient de pratiquer des tests utilisateurs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Poids et répartition des masses (si porté par utilisateur), dégagement de chaleur, vibrations, distance et position d'accès, nombres de gestes de soulagement, signes de douleur ou de gêne, marques corporelles sur les utilisateurs, durées d'usage supportées. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, évaluation de l'intensité de la douleur/gêne, représentation graphique des zones d'inconfort.

### A2.3.1.2.2 *Maintien, réglages et ajustements*

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à pouvoir être réglé et adapté aux besoins spécifiques de chaque utilisateur (spécificités anthropométriques et préférences) et aux contraintes contextuelles (environnement et activité), afin de pouvoir être utilisé dans les conditions optimales de performance. Ce critère est fortement lié au confort d'utilisation du système (voir 2.2.1.2.1).
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Une partie de la population des utilisateurs cibles ne pourront pas l'utiliser. <b>Modérés</b> : Utilisation dégradée du système ne permettant pas d'atteindre les performances optimales attendues. Risque de dégrader le confort d'utilisation. <b>Faible</b> : Modification de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système (stratégies de « <i>coping</i> »).
<b>Gains</b>	Permet de fournir à tous les utilisateurs cibles les performances optimales attendues du système.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes à partir de normes et données anthropométriques, tests utilisateurs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Nombre et amplitude des réglages disponibles, tailles, distances et angles compatibles du 5eme au 95eme percentile de la population cible, mesure des performances atteintes selon différents réglages, stabilité du système. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur du compromis efficacité/confort du maintien et des réglages, ainsi que de la facilité de leur mise en œuvre.

### A2.3.1.2.3 Capacité motrice (mouvements et déplacements spécifiques)

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas perturber les mouvements et déplacements spécifiques essentiels liés à l'activité du fantassin. Par conséquent, le système doit contraindre le moins possible la mobilité de l'utilisateur. En outre, le système doit pouvoir être utilisé en situation de mobilité.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Une partie des mouvements ne pourra absolument pas être effectuée durant le port et/ou l'utilisation du système. Le système ne pourra pas être utilisé durant les phases de mobilité. <b>Modérés</b> : Certains mouvements nécessiteront plus d'efforts de la part de l'utilisateur. L'utilisateur devra modifier son activité pour s'adapter au système (stratégies de « <i>coping</i> »).
<b>Gains</b>	L'utilisateur pourra effectuer tous les mouvements spécifiques de son activité de façon habituelle, tout en bénéficiant des fonctionnalités fournies par le système.
<b>Méthodes</b>	Tests utilisateurs comparatifs et/ou de performances avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Nombre et amplitude des mouvements, performances (temps, précision, nombre d'erreurs) sur un parcours représentatif avec utilisation simultanée du système. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, évaluation de l'aisance et de l'effort à fournir pour chaque mouvement/déplacement, facilité d'utilisation du système en cours de déplacement.

### A2.3.1.3 *Evaluation ergonomique des aspects perceptifs*

#### A2.3.1.3.1 *Troubles proprioceptifs*

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas générer de troubles proprioceptifs chez l'utilisateur. L'utilisation de systèmes d'affichage, interférant avec la vision naturelle, peut induire certains conflits perceptifs entraînant des effets secondaires plus ou moins gênants (vertiges, nausées, <i>cybersickness</i> , mal des transports, etc.). Ces troubles peuvent avoir des implications conséquentes pour l'activité du fantassin (perte d'équilibre, troubles de la motricité, troubles visuels, etc.). Cependant, tous les utilisateurs ne présentent pas la même sensibilité à ces troubles.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Incapacité de certains utilisateurs à porter/employer le système même sur une courte période. <b>Modérés</b> : Apparition de troubles à partir d'une certaine durée d'utilisation entraînant une incapacité temporaire à utiliser/porter le système. <b>Faible</b> : Apparition d'effets secondaires chez certains utilisateurs après l'utilisation prolongée du système.
<b>Gains</b>	Permet de fournir à tous les utilisateurs (sauf exceptions) un système utilisable, même sur une période prolongée sans subir d'effets secondaires.
<b>Méthodes</b>	Les troubles proprioceptifs étant subjectifs et présentant une forte variabilité interindividuelle, il convient de pratiquer des tests utilisateurs (avec observations, entretiens et questionnaires) sur un échantillon suffisamment large et sur des périodes prolongées et répétées.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Mesure des indicateurs physiologiques, nombre de déséquilibres sur un parcours, précision de mouvements/déplacements, durée d'utilisation avant apparition des troubles. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires/entretiens, nombre et intensité des « symptômes » ressentis.

### A2.3.1.3.2 Occlusion visuelle

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas perturber la perception de l'environnement réel du fantassin. Certains systèmes de RA utilisent des reconstituteurs portés sur la tête (HMD). Par conséquent, ces dispositifs peuvent masquer tout ou partie du champ visuel naturel de l'utilisateur. Ce critère a une forte implication sur les capacités motrices des utilisateurs (voir 2.2.1.2.3) et peut induire un risque d'apparition de troubles proprioceptifs (voir 2.2.1.3.1).
<b>Risques</b>	<p><b>Fort</b> : Champ de vision insuffisant pour observer et/ou se déplacer dans l'environnement réel. « Angles morts » pouvant masquer certaines parties du champ visuel.</p> <p><b>Modérés</b> : Diminution des performances d'observation et/ou de déplacement.</p> <p><b>Faible</b> : Modification de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système (stratégies de « coping »)</p>
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système ne perturbant pas les capacités d'observation et/ou de déplacement.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes et tests utilisateurs d'évaluation ou comparatifs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<p><u>Objectives</u> : Mesure du champ visuel, performance observation (temps et précision détection de cibles), performance déplacement.</p> <p><u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, facilité d'observation/déplacement.</p>

### A2.3.1.3.3 Perception visuelle (mouvements, distances, couleurs et acuité)

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas perturber la perception visuelle naturelle de l'utilisateur. L'activité du fantassin se repose considérablement sur ses capacités visuelles (observation, détection, estimation des distances, visée pour tir, etc.). Il est donc essentiel que le système de RA les perturbe le moins possible. De plus, le système doit être utilisable quel que soit l'environnement lumineux (de forte luminosité à usage nocturne).
<b>Risques</b>	<p><b>Fort</b> : Réduction importante des capacités visuelles de l'utilisateur conduisant à une impossibilité d'usage durant certaines phases de l'activité ou dans certaines conditions environnementales (forte luminosité ou nuit), ou de non détection de cibles/obstacles.</p> <p><b>Modérés</b> : Effets secondaires (maux de tête, trouble de la vision, etc.).</p> <p><b>Faible</b> : Modification de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système (stratégies de « coping »).</p>
<b>Gains</b>	Permet aux utilisateurs de conserver leurs capacités visuelles optimales.
<b>Méthodes</b>	Tests utilisateurs d'évaluation ou comparatif avec observations, entretiens et questionnaires. Tests ophtalmologiques (test de Monoyer, d'Ishihara, etc.)
<b>Métriques</b>	<p><u>Objectives</u> : Résultats aux tests ophtalmologiques, nombre de bonnes réponses, distance de lecture, précision d'évaluation des distances et mouvements.</p> <p><u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur du confort visuel.</p>

### A2.3.1.4 *Evaluation ergonomique opérationnelle*

#### A2.3.1.4.1 *Compatibilité avec équipements (et avec leur utilisation)*

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas perturber l'utilisation des autres équipements nécessaires à l'activité du fantassin. Le port, la saisie et mise en œuvre rapide des équipements sont essentiels dans certaines situations.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Certains équipements sont incompatibles du port et/ou de l'utilisation du système de réalité augmentée. <b>Modérés</b> : La mise en œuvre de certains équipements est dégradée. <b>Faible</b> : Modification de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système (stratégies de « coping »)
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système compatible de l'usage des équipements essentiels à l'activité de l'utilisateur.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes et tests utilisateurs comparatifs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Nombre d'équipements compatibles, degrés de compatibilité (port, saisie, mise en œuvre), temps de mise en œuvre, temps de réalisation de tâches spécifiques employant d'autres équipements, précision d'utilisation des équipements. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur de la facilité et du confort d'utilisation des autres équipements.

#### A2.3.1.4.2 *Furtivité*

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas nuire à la furtivité du fantassin. Ce critère est particulièrement important pour le fantassin débarqué dans les phases de reconnaissance/infiltration en mode discrétion, ainsi que de nuit.
<b>Risques</b>	<b>Modérés</b> : Le système nuit à la furtivité du fantassin, même à longue distance. <b>Faible</b> : le système nuit à la furtivité du fantassin à courte distance.
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système qui conserve la furtivité du fantassin.
<b>Méthodes</b>	Ce critère n'étant pas subjectif, il peut facilement être étudié par évaluations expertes mais peut aussi être intégré dans les protocoles de tests utilisateurs.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Distance et temps de détection selon réglage luminosité. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur du compromis luminance/lisibilité/furtivité du restituteur de réalité augmentée.

## A2.3.2 Evaluation du système (logiciel/interfaces logicielles)

### A2.3.2.1 Evaluation ergonomique des aspects perceptifs

#### A2.3.2.1.1 Visibilité et lisibilité

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à afficher des informations augmentées, qui soient visibles et lisibles quel que soit l'environnement visuel en arrière-plan. Ce sont les choix de conception des IHM qui sont étudiés ici, afin de déterminer les caractéristiques graphiques optimales des éléments à afficher.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Les informations affichées sont illisibles et donc inaccessibles à l'utilisateur quel que soit l'environnement. <b>Modérés</b> : Certaines informations sont illisibles, ou certains environnements rendent toutes les informations illisibles. <b>Faible</b> : Modification de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système (comme baisser la tête vers le sol, ou mettre la main devant le restituteur par ex.).
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système lisible en toute circonstance.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes et tests utilisateurs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : performance de lecture (temps, précision, nombre d'erreurs) selon l'environnement, le type, les caractéristiques graphiques et la distance d'affichage des informations augmentées. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, confort de lecture, besoin d'accommodation, effets secondaires (maux de têtes, douleurs oculaires, etc.).

### A2.3.2.1.2 Occlusion visuelle (par les Items augmentés de l'IHM)

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas masquer l'environnement réel par l'affichage d'information augmentée. La perception visuelle de l'environnement réel doit être prioritaire pour le fantassin et particulièrement dans les phases de déplacements (visibilité du relief et des obstacles) et dans les phases d'observation (détection de cibles non prévues).
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Impossibilité de percevoir une partie de l'environnement réel. <b>Modérés</b> : Une partie de l'environnement réel demande plus d'effort de la part de l'utilisateur pour être perçue. <b>Faible</b> : Stratégies de « coping », mouvements de tête pour compenser les angles morts.
<b>Gains</b>	Fournir un système ne perturbant pas la perception de l'environnement réel.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes et tests utilisateurs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Performance de lecture (temps, précision, nombre d'erreurs) d'éléments situés dans l'environnement réel. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur du compromis visibilité des éléments augmentés/réels.

## A2.3.2.2 *Evaluation ergonomique des aspects cognitifs*

### A2.3.2.2.1 *Basculement attentionnel*

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à limiter le basculement attentionnel de l'utilisateur. En effet, si l'affichage des informations augmentées est peu ou pas correctement « fusionné » avec l'environnement réel, l'utilisateur percevra deux espaces informationnels distincts, et devra effectuer des va-et-vient attentionnels entre son IHM et l'environnement réel.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Risque de tunnel cognitif induisant une perte de perception, soit de l'environnement réel, soit de l'IHM. Impossibilité pour l'utilisateur de percevoir les informations augmentées et l'environnement réel simultanément. <b>Modérés</b> : Perte de cohérence entre informations augmentées et référents réels, risque d'augmentation de la charge cognitive pour effectuer mentalement cette « fusion informationnelle ».
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système de réalité augmentée effectif, avec des informations correctement intégrées dans l'environnement réel, facilitant ainsi le traitement cognitif de la situation.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes et tests utilisateurs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Performance de lecture d'éléments réel et augmenté simultanés (temps, précision, nombre d'erreurs), nombre de non détections de cibles. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, facilité de lecture/détection réel/augmentée, impression d'intégration des deux espaces.

#### A2.3.2.2.2 Charge cognitive

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à ne pas augmenter considérablement la charge mentale de l'utilisateur. Les ressources cognitives étant limitées, l'usage d'un système ne doit pas induire une surconsommation de ces ressources, au détriment des autres activités de l'utilisateur.
<b>Risques</b>	<p><b>Fort</b> : Saturation cognitive, risque de rejet d'utilisation et/ou de tunnel cognitif au dépend de la perception de l'environnement réel.</p> <p><b>Modérés</b> : Utilisation coûteuse, augmentant momentanément le basculement attentionnel et donc les risques qui en découlent.</p> <p><b>Faible</b> : Modification de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système (stratégies de « coping »).</p>
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système facilement utilisable, quel que soit l'état de stress du fantassin et de ses autres activités simultanées.
<b>Méthodes</b>	<p>D'une manière générale, les inspections expertes à l'aide de critères ergonomiques (Critères de Bastien et Scapin par exemple) permettent d'améliorer l'utilisabilité des IHM et donc d'abaisser la charge cognitive nécessaire.</p> <p>Tests utilisateurs avec paradigme de double tâche, entretiens et questionnaires du type Nasa TLX par exemple.</p>
<b>Métriques</b>	<p><u>Objectives</u> : Performances (temps de réponse, précision) tests double tâche,</p> <p><u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires Nasa LTX ou autres, satisfaction utilisateur du compromis efficacité/facilité, fatigue et effort mental ressentis.</p>

### A2.3.2.2.3 Conscience de la situation (situation awareness)

<b>Description</b>	Un des buts principaux des systèmes de RA est de fusionner un ensemble d'informations tactiques, directement dans l'environnement réel, pour faciliter son traitement par le fantassin. Il acquiert ainsi une meilleure représentation et compréhension de la situation opérationnelle. Ce critère se réfère justement à la capacité d'un système à favoriser cette prise de conscience de la situation.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Avoir une représentation erronée de la situation (mauvaise localisation d'ennemis, d'objectifs, etc). <b>Modérés</b> : Le système ne permet pas une représentation aisée de la situation (charge mentale importante, localisation imprécise des informations).
<b>Gains</b>	Permet de fournir un système favorisant l'avantage tactique des fantassins en améliorant (rapidité et précision accrue) la perception de la situation opérationnelle et donc améliore la réactivité et la prise de décision.
<b>Méthodes</b>	Evaluations expertes et tests utilisateurs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Performances (temps et précision) de localisation réelle de cibles augmentées statiques ou dynamiques. <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, confiance ressentie dans la pertinence et la précision des informations affichées par le système.

### A2.3.2.3 *Evaluation ergonomique opérationnelle*

#### A2.3.2.3.1 *Performances opérationnelles sur tâches spécifiques*

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à apporter un gain opérationnel sur des tâches élémentaires spécifiques de l'activité du fantassin (observation, acquisition de cible, déplacement, etc.). Il s'agit ici de mesurer les performances obtenues par l'utilisateur grâce au système de réalité augmentée.
<b>Risques</b>	<b>Fort</b> : Sur chacune des tâches, le système ne permet pas d'atteindre les performances obtenues par le fantassin sans le système. <b>Modérés</b> : Pour atteindre le même niveau de performance sur certaines tâches, le système nécessite plus d'efforts de la part de l'utilisateur ou de modifier lourdement sa façon de faire habituelle (apprentissage important nécessaire). <b>Faible</b> : Modification légère de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système.
<b>Gains</b>	Permet d'atteindre un niveau de performance supérieur sur toutes les tâches spécifiques, sans nécessiter un lourd apprentissage.
<b>Méthodes</b>	Tests utilisateurs comparatifs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<u>Objectives</u> : Performances obtenues sur les tâches comparativement à une situation témoin classique (sans système de RA). <u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur sur le compromis efficacité/facilité d'usage, facilité d'appropriation.

### A2.3.2.3.2 Performances opérationnelles sur scénarios représentatifs

<b>Description</b>	Ce critère se réfère à la capacité du système à apporter un gain opérationnel sur des scénarios représentatifs de l'activité du fantassin. Ces scénarios devront intégrer différentes tâches spécifiques, impliquant l'utilisation du système RA. L'objectif ici est de mesurer le gain du système sur l'ensemble d'une mission, l'enchaînement, l'utilisabilité des fonctions secondaires (ranger, préparer le système, etc.), ainsi que de vérifier sa compatibilité avec les autres actions du fantassin non ciblées initialement.
<b>Risques</b>	<p><b>Fort</b> : La mise en œuvre du système sur un scénario complet n'apporte pas de gain opérationnel ou un niveau de performance moindre.</p> <p><b>Modérés</b> : Le système n'est pas compatible avec certaines autres actions non prévues initialement ou le fantassin doit modifier profondément son activité.</p> <p><b>Faible</b> : Modification légère de l'activité de l'utilisateur pour s'adapter au système.</p>
<b>Gains</b>	Permet de fournir un niveau de performance supérieur sur un scénario complet, sans modifier profondément l'activité du fantassin.
<b>Méthodes</b>	Tests utilisateurs comparatifs avec observations, entretiens et questionnaires.
<b>Métriques</b>	<p><u>Objectives</u> : Performance sur scénario (temps, précision) comparativement à une situation de référence sans le système de RA.</p> <p><u>Subjectives</u> : Réponses aux questionnaires, satisfaction utilisateur du compromis efficacité/facilité d'usage, facilité d'appropriation, stratégies d'utilisation mises en place, confiance dans le système.</p>