THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Informatique

École doctorale : Information, Structures, Systèmes

Unité de recherche : Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), UMR5506, France

Réalité virtuelle adaptative indépendante de la tâche : Exploration et évaluation de systèmes d'aide sans connaissance de l'objectif de l'utilisateur.

Présentée par Simon BESGA
Le 15 Mai 2025

Sous la direction de Nancy RODRIGUEZ, Arnaud SALLABERRY et Pascal PONCELET

Devant le jury composé de

Mme Valérie GOURANTON, Maîtresse de Conférences, HDR, INSA Rennes	Rapportrice
M. Frédéric MERIENNE, Professeur, Institut Arts et Métiers de Chalon-sur-Saône	Rapporteur
Mme Indira THOUVENIN, Professeure, Université de Technologie de Compiègne	Présidente du jury
M. Emmanuel DUBOIS, Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse	Examinateur
Mme Nancy RODRIGUEZ, Maîtresse de Conférences, Université de Montpellier	Co-Encadrante
M. Pascal PONCELET, Professeur, Université de Montpellier	Co-Directeur
M. Arnaud SALLABERRY, Professeur, Université de Montpellier Paul-Valéry	Directeur
Mme Gentiane VENTURE, Professeure, Université de Tokyo	Invitée
M. Gilles BAILLY, Directeur de recherche, Sorbonne Université	Invité

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Résumé

L'adaptation en temps réel en réalité virtuelle (RV) est essentielle pour créer des expériences personnalisées et pour informer l'utilisateur sur les actions pertinentes à effectuer dans l'environnement. Traditionnellement, lorsque ces adaptations cherchent à fournir une assistance à l'humain, elles sont axées sur les tâches à réaliser et reposent sur une connaissance explicite des objectifs de l'utilisateur. Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle approche pour la conception de systèmes d'aide de RV adaptative, une conception task-blind, *i.e.* sans aucune connaissance des tâches de l'utilisateur ou tentative de les déduire en temps réel.

Tout d'abord, nous proposons une nouvelle lecture de la littérature en présentant une classification et une modélisation des systèmes adaptatifs en RV. Notre classification se décline en trois axes : le degré de connaissance du système envers les tâches de l'utilisateur, le degré de contrôle donné à l'utilisateur et le niveau d'aide fourni par les systèmes. Cela nous permet de mettre en perspective certains aspects de la conception de systèmes adaptatifs et de proposer un modèle de conception qui : 1) met en lumière et généralise les types d'entrées de ces systèmes, et 2) intègre des composants permettant de mettre en oeuvre les trois axes de la classification.

Nous présentons deux études évaluant des systèmes adaptatifs task-blind qui visent à améliorer les capacités cognitives. Les résultats permettent d'évaluer 1) la faisabilité de l'implémentation de notre approche task-blind dans des cas complexes, 2) l'impact de tels systèmes sur la performance et le comportement des utilisateurs, et 3) les composants de conception principaux qui ont un impact sur l'efficacité de tels systèmes.

Ces travaux laissent envisager des perspectives prometteuses sur la conception des systèmes adaptatifs en RV en général, ainsi que plus spécifiquement sur les systèmes adaptatifs task-blind fournissant une assistance.

Mots-clefs – Réalité virtuelle, interaction humain-machine, informatique centrée humain, cognition, système adaptatif, système d'aide task-blind, conception d'environnements immersifs

Abstract

Real-time adaptation in virtual reality (VR) is essential for creating personalised experiences and for informing the user of the relevant actions to perform in the environment. Traditionally, when these adaptations seek to provide assistance to humans, they are task-oriented and rely on explicit knowledge of the user's goals. In this thesis, we propose a new approach to the design of adaptive VR help systems, a task-blind design, *i.e*. without any knowledge of the user's tasks or any attempt to infer them in real time.

First of all, we propose a new reading of the literature by presenting a classification and modeling of adaptive systems in VR. Our classification can be broken down into three axes: the system's knowledge level of the user's tasks, the degree of control given to the user, and the assistance's level provided by the systems. This enables us to put certain aspects of adaptive system design into perspective, and to propose a design model that: 1) highlights and generalises the types of input to these systems, and 2) integrates components to implement the three axes of classification.

We present two studies evaluating task-blind adaptive systems that aim at enhancing cognitive abilities. The results allow us to assess 1) the feasibility of implementing this task-blind approach in complex cases, 2) the impact of such systems on user performance and behavior, and 3) the main design components that have an impact on the efficiency of such systems.

This work points to promising prospects for the design of adaptive systems in VR in general, as well as more specifically for task-blind adaptive systems providing assistance.

Keywords – Virtual reality, human-computer interaction, human-centred computing, cognition, adaptive system, task-blind help system, immersive environment design

Remerciements

Étant littéralement la dernière partie écrite de cette thèse, les remerciements constituent en fait une partie assez difficile à écrire. Malgré cela, c'est important pour moi de pouvoir remercier ici les personnes qui m'ont apporté du soutien. J'ai bien conscience que la thèse aurait été bien différente sans vous.

Dans un premier temps, je tiens sincèrement à remercier mes encadrant·e·s de m'avoir fait confiance pour amener le sujet dans une direction pas évidente et nouvelle pour tout le monde. Plus précisément, Pascal Poncelet, merci d'avoir proposé de nombreux défis et d'avoir été aussi têtu que moi ; Arnaud Sallaberry, merci d'avoir toujours su prendre du recul et donner des conseils avisés ; Nancy Rodriguez, merci d'avoir été un soutien sur de nombreux aspects de la thèse, aussi bien moral, technique, que sur mes choix de carrière à venir.

Un grand merci aux collègues de l'équipe ADVANSE, faire cette thèse à vos côtés a été un plaisir. En particulier, Vincent, Hugo, Leonardo et Mélanie, merci à vous pour toutes les discussions stimulantes et les très bons moments passés ensemble.

Je tiens également à adresser mes remerciements à Gilles Bailly, Gentiane Venture et Madalina Croitoru. Vous avez chacun·e une vision de la recherche qui m'inspire et qui m'aide à me développer en tant que chercheur.

Je remercie Valérie Gouranton et Frédéric Merienne d'avoir pris le temps de rapporter cette thèse avec un regard critique et constructif. Je remercie aussi chacun·e des membres du jury pour avoir répondu·e présent·e et d'avoir amené·e des discussions et des questionnements très intéressants pour la suite de mes recherches. Merci aussi à Olivier Strauss d'avoir pris le temps de lire ma thèse.

Un grand merci au personnel du LIRMM pour l'accompagnement, ainsi qu'aux très nombreux·ses participant·e·s aux deux expériences réalisées pendant toute cette thèse.

Mais une thèse ce n'est pas qu'un environnement professionnel de qualité, c'est aussi un entourage personnel sur qui j'ai pu compter.

Merci à ma famille évidemment. Tout particulièrement à mes frères qui m'ont beaucoup fait réfléchir sur mes envies et mes choix, chacun à leur manière.

Merci au TAUST, le théâtre m'a fait beaucoup de bien pendant ces trois ans et cela m'a permis de me faire des ami·e·s proches (qui se reconnaîtront) dans cette ville que je ne connaissais pas. De même, un grand merci aux Expl'Orateurs avec qui j'ai passé des moments incroyables, aussi bien sûr scène que hors scène.

Merci aussi à une petite équipe de jeux de rôle qui se reconnaîtra : disons simplement que Muktanai n'est pas la seule à s'être fait de très bon·ne·s ami·e·s cette année.

Il y a aussi de nombreuses personnes que je n'ai pas beaucoup vues depuis le début de cette thèse et, qui même si elles sont loin, m'ont apporté du soutien à leur manière donc un sincère merci à elles.

Mon dernier remerciement est adressé à Léa et Éloïse. Grâce à vous deux, j'ai réussi

à garder une stabilité et une sérénité, même dans les moments difficiles. Vous m'avez apporté un soutien incommensurable et je vous dois beaucoup, merci du fond du cœur.

Pour conclure, je pense avoir appris beaucoup pendant cette thèse, aussi bien professionnellement que d'un point de vue personnel. Je suis sincèrement reconnaissant envers toutes les personnes mentionnées (directement, indirectement, ainsi que celles potentiellement oubliées), et j'espère vous recroiser régulièrement.

Avant propos

Sous l'impulsion du LIRMM et afin de faciliter la lecture du présent texte, nous avons employé le masculin comme genre neutre pour désigner aussi bien les femmes que les hommes.

Les figures présentées dans ce document illustrent des travaux rédigés en langue anglaise (instructions dans les applications, analyse de données, etc), publiés en anglais, ou qui seront amenés à être publiés en anglais. Elles sont donc présentées en anglais dans ce manuscrit mais sont décrites en français et leurs mots-clefs sont traduits dans le texte qui accompagne la figure.

TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction **1**
- 1.1 Problématique et contexte de la thèse . . . 2
- 1.2 Contributions . . . 4
  - 1.2.1 État de l'art et classification . . . 4
  - 1.2.2 « Ranpo Virtual Environment » : influencer le comportement humain . . . 4
  - 1.2.3 « Assisted Immersive Analytics » : influencer la performance humaine . . . 5
- 1.3 Organisation de la thèse . . . 5

2 Aider en réalité virtuelle : les mécanismes d'adaptation interactifs **7**
- 2.1 Réalité virtuelle adaptative . . . 9
  - 2.1.1 Environnement Virtuel Informé . . . 10
  - 2.1.2 Mécanismes interactifs adaptatifs . . . 11
  - 2.1.3 RV adaptative « context-aware » . . . 14
- 2.2 Les processus cognitifs . . . 16
  - 2.2.1 Métacognition . . . 16
  - 2.2.2 L'attention . . . 17
  - 2.2.3 Mémorisation . . . 17
- 2.3 Réalité virtuelle cognitive . . . 18
  - 2.3.1 Adaptation aux états affectifs et cognitifs . . . 19
  - 2.3.2 Les illusions en RV . . . 20
  - 2.3.3 L'augmentation cognitive . . . 21
  - 2.3.4 Approche de design centrée super-pouvoirs . . . 22
- 2.4 Immersive Analytics . . . 23
  - 2.4.1 Définition de l'Immersive Analytics . . . 24
  - 2.4.2 Les défis à relever . . . 26
  - 2.4.3 Un cas d'usage proche des difficultés réelles . . . 26
- 2.5 Espace de classification des systèmes de RV adaptative . . . 28
  - 2.5.1 Le niveau d'assistance fourni par le système . . . 29
  - 2.5.2 Le niveau de connaissance du système sur les tâches de l'utilisateur 30
  - 2.5.3 Le niveau de contrôle exercé par l'utilisateur sur les AIM . . . 32
- 2.6 Classification de l'état de l'art . . . 33
  - 2.6.1 Nomenclature des volumes . . . 33
  - 2.6.2 Positionnement des travaux et densité des volumes . . . 34
- 2.7 Modélisation de la conception des systèmes de RV adaptative . . . 39
  - 2.7.1 Présentation de notre modèle . . . 39

2.7.2 Positionnement et conclusion 43

3 « Ranpo Virtual Environment » : impact sur le comportement d'un système d'aide task-blind lors de l'exploration spatiale d'une scène de crime 45
3.1 Introduction 46
3.2 Conception du système 47
3.2.1 Récupération des données 48
3.2.2 Les systèmes d'aide 49
3.3 Conception de l'expérience 52
3.3.1 Hypothèses 53
3.3.2 Protocole expérimental 54
3.3.3 Participants 55
3.3.4 Procédure 56
3.3.5 Dispositif expérimental 57
3.4 Résultats 61
3.4.1 Méthodologie d'analyse 61
3.4.2 Similarités 61
3.4.3 Différences 64
3.4.4 Analyse du comportement 65
3.5 Discussion 66
3.5.1 Vérification des hypothèses 67
3.5.2 Points de suivi 68
3.6 Conclusion 69

4 « Assisted Immersive Analytics » : impact sur la performance d'un système d'aide task-blind lors de l'exploration de données multidimensionnelles 71
4.1 Introduction 72
4.2 Conception du système 73
4.2.1 Le système d'Immersive analytics 74
4.2.2 Récupération des données 77
4.2.3 Description des aides 78
4.2.4 Description des systèmes d'aide 79
4.3 Conception de l'expérience 82
4.3.1 Hypothèses 83
4.3.2 Protocole expérimental 84
4.3.3 Participants 87
4.3.4 Procédure 87
4.3.5 Dispositif expérimental 88
4.4 Résultats 91
4.4.1 Méthodologie d'analyse 91
4.4.2 Résultats 92
4.5 Discussion 99
4.5.1 Vérification des hypothèses 99
4.5.2 Points de suivi 101
4.5.3 Limitations 101
4.6 Conclusion 102

5 Conclusions et perspectives **105**
5.1 Résumé des contributions 106
5.2 Perspectives 108
5.2.1 Les systèmes d'aide task-blind 108
5.2.2 Notre classification et notre modèle 109
5.2.3 L'éthique des systèmes adaptatifs en RV 110

Glossaire **113**

Bibliographie **115**

A Annexes **I**

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Sommaire

1.1 Problématique et contexte de la thèse 2

1.2 Contributions 4

1.2.1 État de l'art et classification 4

1.2.2 « Ranpo Virtual Environment » : influencer le comportement humain 4

1.2.3 « Assisted Immersive Analytics » : influencer la performance humaine 5

1.3 Organisation de la thèse 5

Au début de cette thèse, nous nous sommes posé la question : qu'est-ce qu'il manquerait à une personne pour avoir les capacités d'analyse et de déduction de Sherlock Holmes ? Certains diront que ce personnage de fiction possède un pouvoir de super-déduction, tandis que d'autres, dont son créateur Sir Arthur Conan Doyle, évoqueront plutôt un humain typique mais avec des capacités mentales particulièrement développées pour l'analyse de son environnement. Sherlock est parfois aidé par son entourage (Dr Watson, agents de Scotland Yard, etc), qui constitue une sorte de système extérieur ne donnant jamais une solution mais fournissant une aide dans ses réflexions. Serait-il possible d'augmenter, grâce à un système d'aide extérieur, les capacités d'un utilisateur pour égaler celles de Sherlock ?

Naturellement, nous nous sommes demandé si ce concept de système d'aide extérieur peut être une inspiration, pour un mécanisme numérique ayant une fonction similaire. Pouvons-nous mettre en place un système numérique en interaction avec notre environnement permettant « d'améliorer » nos capacités mentales ?

1.1 Problématique et contexte de la thèse

Ce début de raisonnement permet de positionner nos travaux, qui consistent, entre autres, à se demander si réaliser un tel système est faisable. Si nous poursuivons la métaphore et que nous souhaitons créer un tel système, il faudrait que ce système extérieur puisse :

1. Connaître et analyser l'environnement autour de l'humain.
2. Analyser le comportement de l'humain et améliorer ses capacités mentales.
3. S'adapter à la fois à l'humain utilisant le système et à la situation où l'humain à besoin de ce système.

Cela permet ainsi de comprendre que nos travaux touchent trois domaines de recherche en informatique :

1. **La réalité virtuelle (RV)** : ce domaine de recherche exploite l'informatique pour simuler dans un environnement virtuel en 3D le comportement d'agents virtuels en interaction entre eux et avec une personne en immersion. Par nature, lors de la création d'un environnement de RV, les concepteurs peuvent donc permettre au système extérieur de connaître l'ensemble de l'environnement autour de l'humain.
2. **Les sciences cognitives** : ce domaine a notamment pour but la description ou la simulation de la pensée humaine. De même, les concepteurs peuvent concevoir le comportement du système extérieur en fonction des connaissances que l'on a sur l'humain.
3. **L'interaction humain-machine (IHM)** : ce domaine est consacré à l'étude, la conception et l'évaluation des systèmes informatiques interactifs. L'interaction étant au cœur de ce domaine, le processus qui permet au système d'adapter son comportement à un utilisateur spécifique (*i.e.* l'adaptation) est une partie très

importante du système. De même, les concepteurs peuvent définir le comportement du système extérieur en fonction des connaissances générées en temps réel par l'humain, l'environnement ou l'interaction entre les deux.

En particulier ce troisième élément, l'adaptation du système extérieur, se place au cœur de nos problématiques de recherche. Afin que notre système extérieur puisse proposer de l'assistance lors de la réflexion d'un utilisateur en RV, il va avoir besoin d'informations en continu sur l'état de l'environnement et l'état de l'humain. Tout au long de la thèse, nous allons donc chercher à répondre à des questions du type : quels sont les types de données dont un tel système aurait besoin en temps réel ? Comment concevoir un algorithme d'assistance utilisant ces données ? Enfin, quelles actions peut réaliser le système extérieur afin d'améliorer la performance de l'utilisateur lors de la réalisation de ses tâches ?

Les travaux présentés dans cette thèse étudient la littérature de ces trois domaines de recherches (chapitre 2) afin de proposer et évaluer des systèmes adaptatifs offrant une assistance en RV. Ces systèmes sont implémentés et évalués au cours de deux études utilisateurs présentées dans les chapitres suivants (chapitre 3 et chapitre 4). Au sein de chaque étude, les utilisateurs ont une tâche à accomplir et nos systèmes adaptatifs fournissent une assistance. Deux types d'effets sur les utilisateurs permettent alors de caractériser nos systèmes : le comportement de l'utilisateur et la performance de l'utilisateur pour la tâche donnée.

Afin d'être encore plus précis, il existe une problématique supplémentaire sur laquelle nous nous concentrons dans cette thèse, et qui est liée aux situations dans lesquelles se trouve un personnage de fiction comme Sherlock Holmes. Il fait face à des problèmes dont la résolution est inconnue, aussi bien de lui, que de son ami médecin ou de Scotland Yard. Si l'on refait le parallèle avec les systèmes adaptatifs, cela signifie que le système extérieur doit fournir une assistance à l'utilisateur sans aucune connaissance de la tâche que ce dernier doit accomplir. Cette condition, en limitant les données disponibles à l'entrée du système, complique son implémentation et son efficacité. Le cœur des travaux de recherche de cette thèse porte donc sur ce défi et peut être résumé par la problématique suivante :

Problématique de la thèse

Est-il possible d'améliorer les performances de l'humain dans la réalisation d'une tâche donnée sans que le système d'assistance ne connaisse cette tâche ?

En résumé, nos travaux se placent à la frontière entre la RV, l'IHM et les sciences cognitives, et étudient les systèmes adaptatifs. Plus précisément, nous étudions les systèmes adaptatifs en RV qui, sans aucune connaissance préalable sur la tâche de l'utilisateur, fournissent une aide à ce dernier, lui permettant d'améliorer ses performances ou d'adapter son comportement. Notre problématique consiste à, dans un premier temps, prouver la faisabilité, et dans un second temps, montrer l'efficacité de tels systèmes ainsi qu'explorer leurs caractéristiques de conceptions.

1.2 Contributions

Nous présentons dans cette thèse, trois contributions. La première est une relecture, via une classification, du domaine de l'adaptation en RV, menant à la mise en place d'un modèle de conception de systèmes adaptatifs. La deuxième contribution est une étude qui, en se basant sur notre modèle, montre la faisabilité des systèmes adaptatifs aveugles aux tâches et qui fournissent une assistance, systèmes que nous nommons « systèmes d'aides task-blind ». Nous montrons notamment qu'un tel système permet d'influencer le comportement sans impacter négativement les performances. La troisième contribution est une étude montrant la capacité d'un système d'aide task-blind basé sur notre modèle à améliorer les performances des utilisateurs. Nous explorons notamment certaines hypothèses afin de comprendre pourquoi et comment de tels systèmes peuvent amener à ces améliorations.

1.2.1 État de l'art et classification

Au sein de l'état de l'art (chapitre 2), nous présentons la littérature autour de l'adaptation dans les domaines de la RV (section 2.1) et des sciences cognitives (section 2.2 et section 2.3). Nous présentons aussi le domaine de l'Immersive Analytics (section 2.4), qui constitue un cas d'application concrétisant beaucoup des enjeux liés à notre problématique. Les principales contributions de ces travaux consistent en : 1) une nouvelle approche de la littérature via une classification des systèmes adaptatifs selon trois axes, et 2) un modèle de conception de systèmes adaptatifs en RV assimilant cette classification. Ce modèle, ainsi que les huit questions de conception qui l'accompagnent, sont utilisés ensuite pour concevoir nos systèmes adaptatifs task-blind au sein des chapitre 3 et chapitre 4.

Une publication sur cette classification et le modèle est en cours de rédaction.

1.2.2 « Ranpo Virtual Environment » : influencer le comportement humain

Dans le chapitre 3, nous présentons une étude utilisateur qui implémente un système d'aide task-blind conçu à partir de notre modèle de RV adaptative. Ce système est décrit en section 3.2. Il analyse le comportement humain et propose des aides visuelles visant à améliorer l'attention et la mémorisation des utilisateurs. La méthodologie de l'étude ainsi que nos hypothèses sont décrites en section 3.3. L'objectif est d'éliminer la nécessité d'une connaissance explicite des objectifs des utilisateurs, et d'évaluer l'impact d'un tel système sur le comportement et les performances d'un utilisateur (comparé à deux groupes de contrôle). Cette étude est appliquée dans un contexte de compréhension de scène de crime. Les principales contributions de ces travaux suggèrent : 1) qu'il est possible de concevoir un système d'aide task-blind qui à minima n'impacte pas négativement les performances, et 2) qu'un tel système d'aide peut induire de nouveaux comportements.

Ce travail a donné lieu à une publication dans le journal *Springer Virtual Reality* Besga et al. (2025).

1.2.3 « Assisted Immersive Analytics » : influencer la performance humaine

Dans le chapitre 4, nous présentons une étude utilisateur qui implémente trois systèmes d'aide task-blind conçus à partir de notre modèle de RV adaptative. Ces systèmes sont décrit en sous-section 4.2.4. Ils analysent le comportement humain et proposent des aides visuelles visant à améliorer la métacognition des utilisateurs. La méthodologie de l'étude ainsi que nos hypothèses sont décrites en section 4.3. L'objectif est de clarifier la capacité d'un système d'aide task-blind à significativement améliorer la performance des utilisateurs concernant leur tâche. De plus, cette étude explore les caractéristiques de conceptions de tels systèmes et leur impact sur l'état cognitif des utilisateurs. Cette étude est appliquée dans un contexte de tâche de clustering en Immersive Analytics (voir la section 2.4 pour la définition). Les principales contributions de ces travaux portent sur : 1) la possibilité d'améliorer les performances en utilisant des systèmes d'aide task-blind, 2) la caractérisation des composants de conception qui jouent un rôle dans l'efficacité du système, et 3) l'exploration du lien entre l'amélioration des performances de l'utilisateur et l'état cognitif de ce dernier lors de l'expérience.

Ce travail a donné lieu à un article qui est actuellement soumis dans le journal *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* (*TOCHI*).

1.3 Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en cinq chapitres. Dans cette introduction nous avons abordé le contexte, la motivation et la problématique traité dans cette thèse, ainsi que ses principales contributions.

Le chapitre 2 présente l'état de l'art de l'adaptation en réalité virtuelle avec un point de vue orienté IHM et sciences cognitives. Nous souhaitons dans ce chapitre retravailler la définition de l'adaptation en RV ainsi que ses caractéristiques de conception. Nous proposons une nouvelle lecture de la littérature permettant de dégager une classification du domaine et un modèle de conception de système adaptatif. Nous présentons également en détail notre positionnement au sein de l'adaptation en RV, à savoir l'étude des systèmes d'aide task-blind.

Le chapitre 3 se concentre sur la faisabilité et l'évaluation d'un système d'aide task-blind lors d'une étude utilisateur. Nous présentons notre méthodologie afin d'évaluer la faisabilité d'un tel système d'aide, basé sur notre modèle, et qui vise l'amélioration de l'attention et la mémorisation des utilisateurs. Notre cas applicatif est l'étude de la compréhension spatiale et narrative d'une scène de crime, de la part des utilisateurs. Nous montrons comment le comportement d'exploration de la scène par les utilisateurs peut être influencé sans réduction des performances, mettant en avant un premier avantage de ces systèmes.

Le chapitre 4 présente une deuxième étude qui, conçue grâces aux conclusions de notre première étude, montre que les systèmes d'aide task-blind peuvent aussi améliorer les performances. Nous abordons plus en détail les caractéristiques de conception

de ces systèmes, cette fois en visant l'amélioration de la métacognition des utilisateurs. Notre cas applicatif d'Immersive Analytics consiste, pour les utilisateurs, à réaliser une tâche de clustering de données multidimensionnelles. Nous discutons aussi les liens possibles entre amélioration de performances et processus cognitifs améliorés chez l'humain.

Le dernier chapitre conclue cette thèse en résumant les contributions et en présentant les perspectives de nos travaux (chapitre 5). Ces dernières concernent les améliorations possibles pour l'utilisation de systèmes d'aide task-blind dans des contextes variés et les pistes ouvertes par notre classification de la littérature et le modèle proposé concernant la compréhension du domaine. Ce chapitre se termine par une discussion sur les questionnements éthiques liés à ces systèmes.

CHAPITRE 2

AIDER EN RÉALITÉ VIRTUELLE : LES MÉCANISMES D'ADAPTATION INTERACTIFS

Sommaire

2.1 Réalité virtuelle adaptative 9
2.1.1 Environnement Virtuel Informé 10
2.1.2 Mécanismes interactifs adaptatifs 11
2.1.3 RV adaptative « context-aware » 14
2.2 Les processus cognitifs 16
2.2.1 Métacognition 16
2.2.2 L'attention 17
2.2.3 Mémorisation 17
2.3 Réalité virtuelle cognitive 18
2.3.1 Adaptation aux états affectifs et cognitifs 19
2.3.2 Les illusions en RV 20
2.3.3 L'augmentation cognitive 21
2.3.4 Approche de design centrée super-pouvoirs 22
2.4 Immersive Analytics 23
2.4.1 Définition de l'Immersive Analytics 24
2.4.2 Les défis à relever 26
2.4.3 Un cas d'usage proche des difficultés réelles 26
2.5 Espace de classification des systèmes de RV adaptative 28
2.5.1 Le niveau d'assistance fourni par le système 29
2.5.2 Le niveau de connaissance du système sur les tâches de l'utilisateur 30
2.5.3 Le niveau de contrôle exercé par l'utilisateur sur les AIM . . . 32
2.6 Classification de l'état de l'art 33
2.6.1 Nomenclature des volumes 33

2.6.2 Positionnement des travaux et densité des volumes 34
2.7 Modélisation de la conception des systèmes de RV adaptative . . . 39
2.7.1 Présentation de notre modèle 39
2.7.2 Positionnement et conclusion 43

Historiquement issue de l'informatique graphique et très fortement liée à ses problématiques, la réalité virtuelle (RV) touche à de nombreux autres domaines : l'interaction humain-machine (IHM), la visualisation de données, les agents virtuels, l'informatique affective (« affective computing » en anglais), les sciences cognitives, etc. L'objectif de la RV est de créer une expérience qui fasse ressentir un monde virtuel (que sa représentation soit proche de la réalité, imaginaire ou artificielle). Depuis les années 80, les visualisations, les systèmes immersifs et les systèmes interactifs cherchent à égaler la perception du monde réel en améliorant la perception des simulations. La définition de la réalité virtuelle fournie par Fuchs et al. (2006) est assez complète :

> **Réalité virtuelle**
> La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec une personne en immersion pseudo-naturelle.

Cette thèse a comme cadre l'adaptation, *i.e.* le processus qui permet au système d'adapter son comportement à un utilisateur spécifique, et explore donc principalement l'interaction de l'utilisateur avec le système de RV. Dans cette thèse, nous nous intéressons uniquement à des problématiques liées au logiciel. La conception graphique des environnements créés dans le cadre de cette thèse s'inspire des pratiques courantes en RV et dans les jeux vidéo (Dillman et al., 2018).

L'objectif de ce chapitre est faire un état des lieux des travaux de recherche portant sur l'adaptation des environnements virtuels. Nous structurons cette analyse autour de trois axes principaux d'adaptation :

1. La définition de l'adaptation et ses aspects techniques d'un point de vue structure du système informatique (voir la section 2.1).
2. L'adaptation des environnements virtuels aux réflexions et états émotionnels de l'humain (voir la section 2.2 et la section 2.3).
3. L'adaptation des environnements à un cas d'usage en particulier, l'Immersive Analytics. En effet, cet exemple illustre l'adaptation du système à un besoin spécifique d'analyse de données, et nous l'utiliserons dans la suite de cette thèse (voir la section 2.4 et le chapitre 4).

2.1 Réalité virtuelle adaptative

Dans cette section, nous explorons la notion d'adaptation des environnements virtuels sous l'angle des systèmes informatiques. Nous abordons les définitions de ces environnements, les concepts associés, ainsi que les mécanismes principaux qui permettent leur adaptation. L'adaptation et la réalité virtuelle sont par essence deux concepts très liés dans la mesure où simuler un monde virtuel avec des entités 3D convaincantes nécessite, par définition, de l'adaptation en temps réel. L'adaptation et la réalité virtuelle sont intrinsèquement liées, dans la mesure où la simulation d'un

monde virtuel immersif avec des entités 3D convaincantes repose, par essence, sur des ajustements en temps réel.

2.1.1 Environnement Virtuel Informé

Le terme « adaptation » n'a pas été immédiatement employé pour décrire cette capacité des environnements virtuels. À l'origine, les adjectifs « intelligent » ou « informé » étaient privilégiés. En effet, il existe une convergence entre les domaines de l'intelligence artificielle, la vie artificielle et la réalité virtuelle comme l'évoquent LUCK et AYLETT (2000), notamment via une approche bioréaliste de la perception et de l'action des agents autonomes. Dans leur revue consacrés aux environnements virtuels informés (EVI) (ou "Information-Rich Virtual Environnements" - IRVE - en anglais), D. A. BOWMAN et al. (2003) soulignent l'absence de définition claire et en proposent plusieurs. Les définitions proposées seront enrichies par les contributions de plusieurs auteurs. Ensuite, le travail de THOUVENIN (2009) permettra d'uniformiser ces concepts à travers une définition plus large :

> **ENVIRONNEMENT VIRTUEL INFORMÉ (EVI)**
> Un EVI est un environnement virtuel doté de modèles à base de connaissance dans lequel il est possible à la fois d'interagir et de permettre des comportements par interprétation de représentations dynamiques ou statiques.

Cette définition nous intéresse particulièrement car elle introduit la notion de modèles à base de connaissance de l'environnement, ce qui constitue un élément clef de l'évolution des environnements virtuels.

Très tôt, la notion d'adaptation de l'environnement fut donc associée aux agents présents au sein de ces environnements. Les bases de connaissance leur permettent d'interpréter et d'interagir, de façon dynamique ou statique, avec les autres agents présents dans le même environnement. La question du rôle de l'humain dans cette adaptation devient capitale et donne naissance à un paradigme fort, la notion de boucle dans l'interaction. L'humain et les agents de l'environnement virtuel doivent co-évoluer, ce qui est décrit comme le paradigme de l'énaction par THOMPSON (2010), DE LOOR et al. (2009) ou encore PEETERS et SEGUNDO-ORTIN (2019). L'interaction entre l'humain et son environnement dans ce paradigme a été alors définie et schématisée de nombreuses fois (voir (BAKER & FAIRCLOUGH, 2022 ; S. FAIRCLOUGH, 2015 ; S. H. FAIRCLOUGH, 2017 ; FUCHS, 2017) pour plus de détails). Cette interaction se décrit comme une boucle de rétroaction fermée, structurée en trois phases clefs : la ***perception*** de l'environnement par l'humain, réalisée en continu, qui entraîne une ***décision***, suivie d'une ***action*** dans cet environnement. Cette boucle est illustrée en figure 2.1. L'action de l'humain est alors perçue par le système, qui s'adapte en conséquence et fournit un *feedback*, c'est-à-dire une modification de l'environnement ou de ses agents. Ce changement est ensuite perçu par l'humain, lui permettant d'initier une nouvelle boucle de décision et d'action, basée sur sa perception actualisée. Ainsi, l'humain et l'environnement co-évoluent en permanence. La réponse du système (les feedback) ainsi que sa capacité à percevoir et interpréter les actions de l'humain constituent des éléments fondamentaux de l'adaptation.

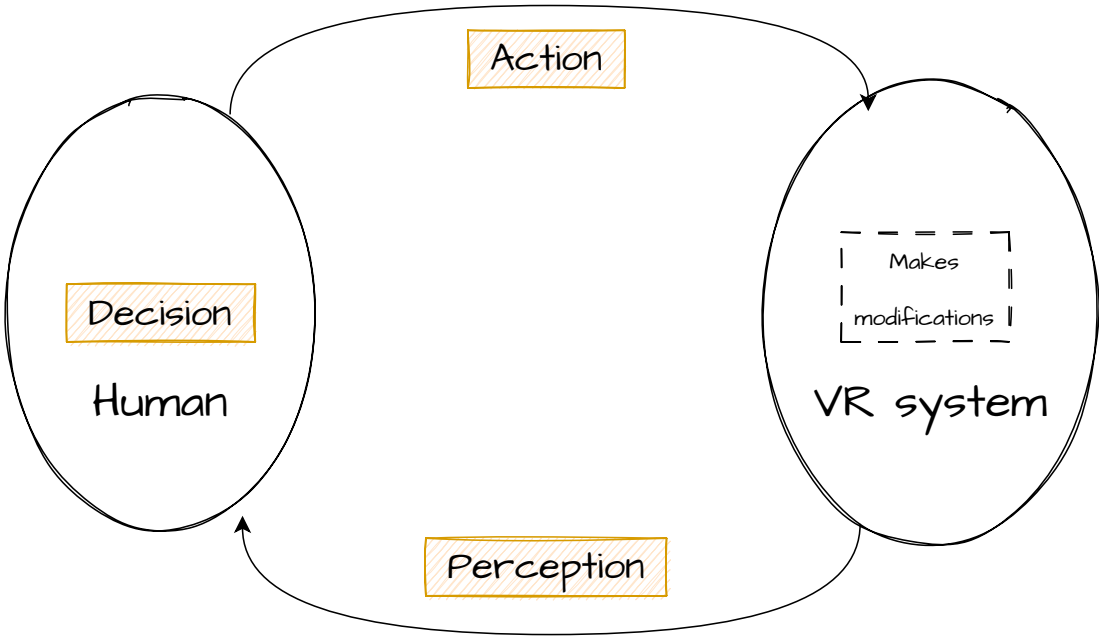


Figure 2.1 – *Boucle de **perception-décision-action** : décrit les trois phases de l'interaction avec un système. Figure inspirée de la définition de* Fuchs (2017).

Cette notion de boucle de ***perception-décision-action*** est à la base de toute forme d'adaptation en RV et, comme nous allons le voir dans la partie suivante, elle constitue la structure la plus courante pour les agents adaptatifs dans un environnement.

2.1.2 Mécanismes interactifs adaptatifs

L'adaptation en temps réel en RV est donc essentielle pour créer des expériences personnalisées et fournir un feedback efficace via des boucles de rétroaction. Elle permet également d'améliorer les performances de l'utilisateur et de réduire toute ambiguïté quant à l'environnement et aux actions pertinentes à y effectuer. Par exemple, Grant et Magee (1998) ont étudié l'impact d'un feedback proprioceptif (ici un feedback qui aide à maintenir la perception de son propre corps lors de la marche) sur l'exploration de vastes environnements virtuels, et des travaux récents (Venkatakrishnan et al., 2024) continuent d'étudier les facteurs contribuant aux expériences négatives lors de l'exploration.

La question de savoir comment les systèmes s'adaptent a suscité un grand intérêt dans diverses disciplines, ce qui a déclenché une vague de recherche sur la RV adaptative (voir Zahabi et Abdul Razak (2020) et Zuki et al. (2022) pour des revues de littératures générales).

Baker et Fairclough (2022) reprennent la définition historique des EVI et la complètent. Ils reformulent alors la RV adaptative pour inclure plus clairement les concepts de boucles de rétroaction évoqués plus tôt :

RÉALITÉ VIRTUELLE ADAPTATIVE

La RV adaptative intègre une surveillance de l'utilisateur et des formes d'adaptation au sein d'une boucle de rétroaction fermée en temps réel. Une telle boucle inclut un répertoire de mécanismes interactifs adaptatifs (« adaptive interactive mechanisms » en anglais - AIM) conçus pour promouvoir un comportement et/ou des expériences spécifiques.

Pour l'ensemble de la thèse, nous utilisons cette définition mais nous souhaitons mettre en avant un aspect en particulier. En effet, BAKER et FAIRCLOUGH (2022) précisent que construire un tel système comprend trois étapes principales : la manipulation des données, la modélisation de l'utilisateur et l'utilisation des AIM pour influencer le comportement ou l'expérience de l'utilisateur. Les auteurs évoquent - sans pour autant clairement l'inclure dans la définition - que ces étapes impliquent trois types de données : *la connaissance du contexte* (les informations sur l'environnement virtuel, les objets et toutes les informations abstraites connexes qu'il contient - voir (D. A. BOWMAN et al., 2003) et sous-section 2.1.1), *la connaissance de l'humain* (les informations sur l'utilisateur, telles que les données physiologiques et les préférences de l'utilisateur) et *la connaissance de la tâche*, cette dernière faisant référence à la compréhension qu'a le système de l'objectif actuel de l'utilisateur. La figure 2.2 illustre l'expérience en boucle fermée et ajoute donc plus clairement les entrées nécessaires à un système de RV adaptative. En haut de la figure, la connaissance du contexte et la connaissance de la tâche sont introduites. Ensuite, sur la base de ces connaissances et des informations extraites du comportement de l'utilisateur (partie droite de la figure), le système s'adapte dynamiquement et fournit un retour d'information.

Les systèmes de RV adaptatifs reposent sur de multiples boucles de rétroaction et sont utilisés dans une grande variété d'applications(ZAHABI & ABDUL RAZAK, 2020 ; ZUKI et al., 2022). Quelques exemples permettent d'illustrer le rôle des AIM dans ces systèmes. En dehors de la RV, certaines études portent également sur les systèmes adaptatifs en temps réel, comme ceux intégrant l'attention humaine dans les véhicules autonomes(GIL et al., 2016). BAI et al. (2012) ont proposé un modèle et ont développé un cadre pour l'adaptation des visualisations qui consiste à redessiner leur composition visuelle en fonction des actions de l'utilisateur. Toutefois, ce modèle repose sur beaucoup de connaissances explicites fournies par l'utilisateur sur son contexte, ce qui pose des limites évidentes dans une adaptation en temps réel où les connaissances préalables sont moins nombreuses. En RV, les systèmes adaptatifs utilisés pour fournir une assistance lors de la formation d'un utilisateur ont fait l'objet d'une étude approfondie (ZAHABI & ABDUL RAZAK, 2020). Par exemple, FRICOTEAUX et al. (2014) ont conçu un environnement où le retour d'information est multimodal et adapté afin d'améliorer l'apprentissage. Ces feedback sont générés à partir d'une analyse en temps réel de l'environnement virtuel, prenant en compte des éléments tels que les informations disponibles sur les objets intelligents de la scène et les prédictions du moteur physique. Leur objectif est d'ajuster dynamiquement la difficulté afin d'optimiser l'apprentissage. Maintenir les utilisateurs dans une zone idéale de charge mentale est de plus en plus l'objectif de la formation en RV adaptative (ZAHABI & ABDUL RAZAK, 2020). Dans cette perspective, TSIAKAS et al. (2015) ont développé un modèle combinant une estimation

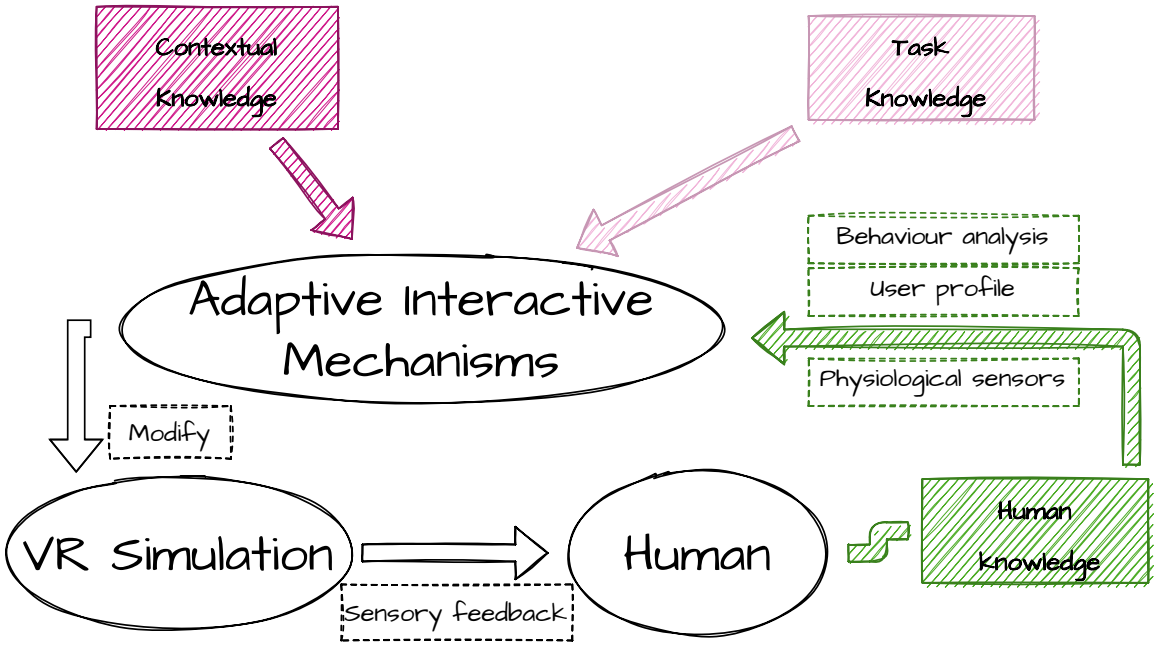


Figure 2.2 – *RV adaptative : les mécanismes interactifs adaptatifs (AIM) sont utilisés pour adapter la simulation RV en temps réel en fonction de trois types d'entrées. Figure inspirée de la définition de* Baker et Fairclough (2022) *et qui explicite les entrées d'un tel système adaptatif.*

de la douleur et une évaluation des performances afin d'adapter dynamiquement les niveaux d'exercice. Ils démontrent que l'état physique de l'utilisateur peut également être pris en compte, lors de l'adaptation de l'environnement à la performance de l'utilisateur.

Parmi les études présentant des systèmes adaptatifs en RV, certaines visent à utiliser moins de connaissances préalables. Une étude récente a présenté un système adaptatif d'aide à la navigation sans utiliser la connaissance des tâches de l'utilisateur comme donnée d'entrée. Alghofaili et al. (2019) ont entraîné un classifieur « long short-term memory » (LSTM) sur les séquences de regard de l'utilisateur pour prédire le besoin de navigation de l'utilisateur. Leur système, sans connaître la destination de l'utilisateur, peut fournir des indications de navigation (comme tourner à gauche ou à droite) sur la base de l'exploration visuelle de l'environnement par l'utilisateur. Cependant, les missions de navigation sont très spécifiques et le système sait que les utilisateurs ont pour objectif de naviguer dans l'environnement, ce qui peut être vu comme une forme de connaissance des tâches a priori.

De manière similaire, Narkar et al. (2024) ont entraîné un modèle visant à estimer l'intention de sélection en fonction du regard de l'utilisateur, notamment dans des situations qui impliquent un problème du « Midas Touch » (faisant référence aux interactions involontaires avec un système). Là encore, les tâches de sélection sont très spécifiques et le système adaptatif est conçu en tenant compte de ce contexte. Toutefois, ces deux travaux montrent que l'intégration de modèles d'apprentissage automatique

pour des tâches ciblées, qui ne constituent généralement pas un objectif en soi pour l'utilisateur, peut améliorer la modélisation de l'intention à une échelle restreinte.

La plupart des systèmes adaptatifs présentés ici ont été conçus en collaboration avec des utilisateurs experts ou spécifiquement pour eux. Dans une certaine mesure, ils reposent sur une connaissance explicite, par le système, des tâches de l'utilisateur. À notre connaissance, il n'existe pas d'autres travaux qui tentent de fournir de l'aide sans une connaissance préalable des tâches. Les travaux antérieurs qui s'appuient uniquement sur une approche fondée sur le comportement humain visent souvent à induire des émotions spécifiques chez les utilisateurs plutôt qu'à créer un système d'assistance (ce que nous allons voir en détail dans la section 2.3). La RV adaptative inclus donc des systèmes ayant des adaptations très différentes les unes des autres, et qui nécessitent beaucoup de connaissances a priori pour leur conception.

2.1.3 RV adaptative « context-aware »

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, les connaissances a priori du système adaptatif jouent un rôle clef dans sa conception. Si l'on s'intéresse à la connaissance du contexte sa description prend un sens différent de la définition habituelle du contexte en IHM. Il nous semble essentiel de préciser la notion de contexte, qui constitue un élément clef dans l'adaptation d'un système, afin de mieux comprendre pourquoi les approches restent, au final, relativement similaires. En IHM, la définition du contexte la plus couramment utilisée demeure, encore aujourd'hui, celle proposée par ABOWD et al. (1999), qui stipule que :

> **CONTEXTE**
> Le contexte est défini comme toute information pouvant être utilisée pour caractériser la situation d'une entité. Une entité désigne une personne, un lieu ou un objet jugé pertinent pour l'interaction entre un utilisateur et une application, y compris l'utilisateur lui-même et les applications concernées.

Ainsi, les auteurs précisent qu'un système est qualifié de « context-aware » s'il exploite le contexte pour fournir un service ou des informations pertinentes à l'utilisateur, la pertinence étant définie en fonction de la tâche de celui-ci. Bien que la RV offre des cas d'application particulièrement intéressants pour les systèmes « context-aware », ces principes ne se limitent pas à ce domaine. Il existe plusieurs approches de modélisation, notamment celle de BAI et al. (2012), qui propose une conception du contexte reposant sur trois aspects distincts : (i) le contexte lié au but de l'utilisateur, (ii) le contexte associé aux problèmes possibles et à leurs solutions, et (iii) le contexte relatif à la connaissance de l'utilisateur par le système. Plus précisément dans le domaine de la RV, DENNEMONT et al. (2013) ont mis en place un modèle de raisonnements sémantiques complexes au sein de l'environnement pour adapter l'interaction. Pour cela, ils utilisent des ontologies fournies en amont au système et qui lui servent de contexte. Cela permet au système de formaliser sémantiquement les objets de la scène, les interactions possibles, les zones d'intérêts, et toutes les modifications possibles associées à ces éléments. La description de ces règles en amont est donc essentielle, en particulier pour définir les tâches de l'utilisateur. Toutefois, le système enrichit également ses propres données

contextuelles au fur et à mesure des interactions.

Yigitbas et al. (2019) s'appuient sur la définition du contexte proposée par Abowd et al. (1999) et exploitent uniquement les données personnelles de l'utilisateur (âge, expérience, humeur, etc.), ainsi que les données spatiales en RV (position relative de l'utilisateur par rapport aux objets, etc.) pour adapter les techniques d'interaction et l'interface. Leur approche illustre concrètement des exemples d'adaptation en RV.

Pour Zhao et al. (2024), la notion de contexte utilisée pour l'adaptation se limite à la tâche que doit accomplir l'utilisateur (et par conséquent à l'outil qu'il sélectionne), ainsi qu'à la densité des données présentes dans l'espace autour de sa main en RV.

Golemati et al. (2006) décrivent en détail trois types de contexte utilisés pour l'adaptation d'une visualisation en RV : (i) le contexte lié à l'utilisateur, (ii) le contexte lié au système (faisant référence plus précisément au hardware) et (iii) le contexte associé à la visualisation et aux données, que nous généralisons ici au concept de tâche de l'utilisateur.

Des travaux tels que ceux de Gupta (2023) mettent davantage en avant l'exploitation des composantes émotionnelles de l'utilisateur pour l'adaptation du système de RV, en intégrant la notion d'empathie aux éléments « context-aware ». Ils cherchent à quantifier la confiance de l'utilisateur envers les agents virtuels afin d'adapter l'interaction avec ces derniers.

Les travaux dans le domaine des systèmes « context-aware » sont nombreux mais la définition du contexte étant très vaste, nous observons assez peu de consensus sur les données précises à considérer pour une adaptation efficace du système, surtout en RV. Nous constatons cependant que beaucoup de ces travaux reprennent d'une manière ou d'une autre une vision du contexte similaire à nos trois types d'entrées définies Nous constatons cependant que de nombreux travaux adoptent, d'une manière ou d'une autre, une vision du contexte similaire à celle de nos trois types d'entrées définies pour les systèmes adaptatifs dans la figure 2.2. Ces entrées se déclinent en trois catégories : (i) un contexte lié à la tâche de l'utilisateur, (ii) un contexte propre à l'utilisateur lui-même, et (iii) un contexte relatif à l'environnement et à l'état du système, qu'il soit matériel ou logiciel. C'est ce troisième type de contexte lié à l'environnement que nous avons appelé connaissance du contexte dans la section précédente et la figure 2.2.

La nécessité de connaître les tâches de l'utilisateur est donc prédominante, bien qu'elle soit rarement mise en avant dans les définitions, y compris à travers les différents mots-clefs du domaine.

Nous nous intéressons à présent à l'étude de l'adaptation d'un système en relation avec l'humain et ses processus de réflexion. La section suivante présente ainsi les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension des processus cognitifs abordés dans cette thèse.

2.2 Les processus cognitifs

De manière général dans cette thèse, nous reprenons une définition habituelle de la cognition (notamment utilisée par WILLETT et al. (2022)) :

> **COGNITION**
> La cognition désigne la capacité des êtres humains à interpréter et à donner un sens à leur environnement.

Les processus cognitifs désignent les mécanismes mentaux spécifiques qui se produisent chez l'humain en situation. Étant particulièrement nombreux, nous nous concentrerons ici sur un sous-ensemble. Il est essentiel de comprendre leur fonctionnement, car, tout comme les systèmes informatiques sont régis par des algorithmes, les processus cognitifs peuvent être considérés comme les algorithmes du cerveau. Dans cette section, nous détaillons les trois processus cognitifs dont nous exploitons certaines caractéristiques dans le reste de cette thèse. Pour chacun d'entre eux, nous en présentons la définition, ainsi que des exemples d'utilisation en RV.

2.2.1 Métacognition

La métacognition est un processus cognitif que l'on décrit via ses deux composants (NELSON, 1990) : le *suivi métacognitif* désigne les pensées, les connaissances et les jugements sur les processus cognitifs ainsi que l'évaluation de ses propres cognitions ; le *contrôle métacognitif* désigne l'utilisation de ces informations afin de modifier sa cognition et son comportement.

La précision de la métacognition possède trois composantes. La *calibration* d'une personne est la différence entre sa performance et son degré de confiance sur sa performance a priori. Cela peut mener à une sur-confiance ou une sous-confiance dans ses performances en cas de mauvaise calibration (HOFFRAGE, 2022 ; KORIAT, 2007 ; UNDORF et al., 2022). La *résolution* d'une personne reflète sa capacité à distinguer les tâches où sa performance est haute et celles où sa performance est basse (KORIAT, 2007 ; UNDORF et al., 2022). L'*alignement suite aux changements* est une composante de la précision d'une personne qui reflète sa capacité à garder un modèle similaire (calibration et résolution) dans des conditions différentes. Un mauvais alignement peut conduire à une précision de métacognition très différente dans un domaine A ou un domaine B (UNDORF, 2020 ; UNDORF et al., 2022).

De manière générale, la métacognition est un processus beaucoup étudié dans un contexte d'apprentissage (POHL, 2022). Cependant on remarque qu'elle commence aussi à être étudiée en tant que métrique d'adaptation dans un contexte d'interaction avec un système. Par exemple, F.-C. YANG et al. (2024) ont étudié la perception des agents virtuels par les utilisateurs. Plus précisément, ils ont présenté l'impact du degré de connaissance et d'intelligence perçues par l'utilisateur envers l'agent (suivi métacognitif) et sur le comportement de l'utilisateur vis-à-vis de l'agent (contrôle métacognitif). EL ALI et al. (2023) ont cherché à comprendre comment l'immersion et les canaux sensoriels, utilisés pour un retour, impactent la capacité à reconnaître

son propre rythme cardiaque (calibration). Ils ont conclu sur l'impact possible de ces recherches sur les dispositifs de biofeedback.

Dans cette thèse, des interfaces visuelles au sein de systèmes adaptatifs ont été conçus afin d'induire une variation dans la métacognition des utilisateurs (voir le chapitre 4).

2.2.2 L'attention

L'attention est notre capacité à se concentrer sélectivement sur des informations spécifiques tout en ignorant les autres stimuli. C'est un processus complexe lié à la perception, à l'action et à la mémoire (Cowan et al., 2024). L'attention spatiale est étroitement liée aux mouvements oculaires (Benedek et al., 2017 ; Hoffman & Subramaniam, 1995) ainsi qu'à la lumière dans la scène (Ai et al., 2021). Vortmann et Putze (2021) et Vortmann et al. (2021) ont étudié en profondeur la classification des états attentionnels.

L'attention peut être influencée par la technique du « Subtle Gaze Direction » (SGD), comme l'ont montré Bailey et al. (2009) dans une configuration sur écran 2D. La méthode SGD utilise le suivi oculaire ainsi que des modifications visuelles mineures pour diriger le regard de l'utilisateur à l'intérieur d'une scène. Les modifications se produisent à la périphérie du champ de vision, mais disparaissent avant que l'utilisateur puisse les examiner avec une vision fovéale de haute acuité. Cette technique a depuis été améliorée grâce à l'exploitation de la saillance visuelle de l'image (Sridharan & Bailey, 2015) et est désormais appliquée dans un contexte de RV (Grogorick et al., 2017 ; Paul & Ragan, 2020). De plus, l'attention serait renforcée en RV par rapport aux dispositifs d'interaction classiques en 2D, notamment lors des tâches de sélection (Li et al., 2020). Cette amélioration se manifesterait aussi bien sur le plan comportemental que neuronal.

Dans cette thèse, des interfaces visuelles au sein de systèmes adaptatifs ont été conçus afin d'induire une variation dans l'attention des utilisateurs (voir le chapitre 3 et le chapitre 4).

2.2.3 Mémorisation

La mémorisation est un processus lié à notre capacité d'enregistrer, de conserver et de se rappeler les expériences passées. La mémorisation est impactée par de nombreux aspects en RV comme le sentiment de présence (Makowski et al., 2017), le facteur multi-sensorielle de la simulation (Dinh et al., 1999), ainsi que l'immersion en elle-même, par exemple, lors de l'utilisation de palais mentaux (Krokos et al., 2019). Bonnail et al. (2023) décrivent de façon très détaillée l'ensemble des manipulations de mémoire possibles en RV. En plus de permettre une bonne vision de comment les souvenirs se construisent (avec une attention particulière sur les souvenirs auto-biographiques), ce travail classifie les modifications de mémoire réalisables et qui tirent partie des limites de la mémoire. La RV peut avoir une influence sur la mémoire, allant d'une influence purement malicieuse à une aide à l'optimisation. Tout comme pour l'attention, l'utilisation du SGD permet aussi d'influencer la mémorisation d'un utilisateur. Rothe

et al. (2018) en ont étudié l'utilisation pour la mémorisation des détails dans un contenu cinématographique à 360°. Ils ont utilisé un système de suivi oculaire et ont placé des interface dans la vue périphérique. Ils ont montré que l'attention et la mémorisation sont liées, et ils ont évalué que la SGD permettait l'amélioration de la mémorisation concernant certaines parties de l'environnement. GAGNON et al. (2018), quant à eux, ont démontré que l'exploration améliore la compréhension et la mémorisation d'une scène.

L'utilisation de la RV dans les enquêtes judiciaires et policières s'est révélée particulièrement prometteuse (ENGSTRÖM, 2018 ; REICHHERZER et al., 2021 ; VAN GELDER et al., 2014). Dans ce domaine, qui constitue le cas d'usage de notre première expérience (voir le chapitre 3), le rappel des événements et l'exploration de la scène jouent un rôle clef. En particulier, REICHHERZER et al. (2022) et ROTHE et al. (2018) ont étudié en profondeur la compréhension et le rappel dans les scénarios de scènes de crime.

Dans cette thèse, des interfaces visuelles au sein de systèmes adaptatifs ont été conçus afin d'induire une variation dans la mémorisation des utilisateurs (voir le chapitre 3).

2.3 Réalité virtuelle cognitive

Nous avons observé que l'adaptation dans un système de RV est étroitement liée à la structure même de l'environnement virtuel, aux données disponibles en entrée et aux règles qui régissent le comportement des entités. Par ailleurs, l'humain constitue un facteur central dans ces systèmes. La variabilité et l'imprévisibilité de ses actions introduisent une incertitude que les systèmes ne peuvent anticiper de manière exhaustive. Ainsi, les systèmes s'adaptent à cette variabilité en exploitant de nombreuses informations contextuelles collectées en amont de l'expérience, notamment sur les tâches, l'utilisateur et le contexte de l'interaction, ainsi qu'en intégrant divers AIM.

Du côté de l'humain, nous constatons que les processus cognitifs jouent également un rôle d'adaptation continue à l'environnement. De plus, ces mécanismes présentent leurs propres limitations, et la littérature montre que les systèmes de RV peuvent les influencer de manière significative.

Dans cette section, nous allons nous concentrer sur les systèmes de RV qui s'adaptent aux états affectifs et cognitifs de l'humain (« Affective and Cognitive States » - ACS). Nous allons examiner les différents types d'adaptations possibles avec de tels systèmes. Nous nous focaliserons ensuite sur deux formes spécifiques d'adaptation cognitive qui retiennent particulièrement notre attention : 1) les illusions, un type d'adaptation visant à manipuler la perception de l'utilisateur sans qu'il en ait conscience ; 2) les augmentations, un type d'adaptation cherchant à améliorer les capacités cognitives. Enfin, nous présenterons une approche qui invite à repenser l'utilisation des systèmes adaptatifs en lien avec la cognition humaine.

2.3.1 Adaptation aux états affectifs et cognitifs

L'étude des états affectifs et cognitifs (ACS) des humains est une partie importante de la recherche en RV. Les états affectifs découlent principalement des traits de personnalité, des expériences personnelles et sont liés aux impulsions primordiales (Barrett, 2017). Ils affectent la prise de décision et peuvent être influencés, par exemple, par les récits, le contenu narratif et les préférences. Pour ce qui est des états cognitifs, les facteurs susceptibles de les influencer sont, entre autres, la difficulté inhérente à une tâche, la quantité de distractions et le format utilisé pour donner des instructions (Luong et al., 2022).

Ces deux types d'états, affectif et cognitif, sont largement étudiés pour fournir des environnements plus immersifs et plus engageants en utilisant des capteurs physiologiques pour collecter des données en temps réel auprès des utilisateurs (Barathi et al., 2020 ; Bian et al., 2016 ; Peifer et al., 2014). Les environnements virtuels peuvent être modulés de manière plus ou moins transparente afin de s'adapter à l'état affectif et cognitif de l'utilisateur (Zahabi & Abdul Razak, 2020). Luong et al. (2022) ont réalisé une analyse approfondie de la littérature sur l'intégration de l'affect et de la cognition en RV, aboutissant à une définition claire :

> **RV affective et cognitive**
> La RV affective et cognitive désigne l'étude des systèmes et applications de réalité virtuelle qui induisent, reconnaissent ou exploitent des états affectifs et cognitifs.

Les auteurs ont montré que l'étude du comportement humain dans la RV peut avoir plusieurs objectifs : induire un ACS spécifique chez l'utilisateur, reconnaître la présence d'un ACS chez l'utilisateur (en temps réel, avant ou après une expérience), ou exploiter la présence d'un ACS chez l'utilisateur (en temps réel, avant, ou après une expérience).

La liaison entre les mécanismes cognitifs inhérents à l'humain et les algorithmes des systèmes de RV adaptative est ici clairement établie. Dans cette thèse, nous nous plaçons dans l'études des systèmes de RV qui induisent, reconnaissent ou exploitent uniquement les états cognitifs. Les exemples mis en avant par Luong et al. (2022) dans leur revue de la littérature, présentent des adaptations du système non pas aux actions explicites de l'humain mais à une compréhension cognitive (et affective aussi en l'occurrence) de ce dernier. Un autre constat fait par les auteurs est que rares sont les systèmes qui font les trois en même temps (induire, reconnaître et exploiter un ACS), notamment à cause de la phase de reconnaissance.

Comme l'a déclaré Norman (1993), « le pouvoir de l'esprit sans aide est fortement surestimé. Sans aide extérieure, la mémoire, la pensée et le raisonnement sont tous limités ». Nous pensons que la RV correspond à la vision qu'avait Card et al. (1999) de la visualisation de l'information, et que cela « consiste à exploiter le support dynamique, interactif et peu coûteux des ordinateurs graphiques pour concevoir de nouvelles aides externes qui améliorent les capacités cognitives ». Notre positionnement est le suivant : nous exploitons des méthodes comportementales (suivi des comportements des utilisateurs) afin de reconnaître et d'exploiter leurs ACS. L'objectif est de fournir

une assistance pertinente visant à améliorer certaines capacités cognitives, telles que l'attention et la mémorisation (voir le chapitre 3), ainsi que la métacognition (voir le chapitre 4).

2.3.2 Les illusions en RV

Il nous semble important de présenter les illusions en RV car elles constituent une forme d'adaptation aux états affectifs et cognitifs. Elles ont été caractérisées par POHL (2022), inspiré par la définition d'une illusion d'optique, de la manière suivante :

> **ILLUSION**
> Les illusions ont cinq caractéristiques principales :
> - La déviation par rapport à la réalité (par réalité, on entend une norme acceptée)
> - La déviation systématique (direction prévisible)
> - La production involontaire (ou inconsciente) de l'illusion pour l'humain
> - L'impossibilité d'éviter ou de réduire l'illusion
> - Un aspect universel

Une définition plus générale des manipulations perceptives (dont les illusions font partie) est aussi proposée par BONNAIL et al. (2023) et TSENG et al. (2022) : « Les manipulations perceptives sont des mécanismes fondés sur les limites de la cognition et de la perception des utilisateurs, avec l'intention claire d'influencer les utilisateurs vers un résultat spécifique. » Ici les deux définitions se complètent. Les illusions sont donc par définition des formes d'adaptation qui ne cherchent pas forcément l'interaction consciente avec l'utilisateur mais qui ont un résultat assuré.

Les illusions jouent sur les limites de nos perceptions et représentent une forme de manipulation qui peut aider l'utilisateur sans que ce dernier ne s'en rende compte. Par exemple, les illusions de redirection sont des techniques de manipulation de l'environnement qui poussent l'utilisateur à avoir un comportement physique réel différent de celui qu'il est convaincu d'avoir dans l'environnement virtuel. Cela permet notamment de fluidifier des déplacements, de donner des retours haptiques améliorés ou de donner des sensations nouvelles. Par exemple, nous pouvons citer RIETZLER et al. (2018) et SUN et al. (2018) pour la redirection de la marche, AZMANDIAN et al. (2016) et GESLAIN et al. (2022) pour la redirection de la main, SAMAD et al. (2019) pour l'illusion sur la sensation de poids et GONZALEZ-FRANCO et LANIER (2017) pour une vue d'ensemble du domaine. Les illusions jouent aussi sur la cognition et le comportement des utilisateurs (voir par exemple (LIU, 2023) pour une revue sur l'effet Proteus, faisant référence au fait de changer son comportement en fonction des caractéristiques physique de son avatar).

Pour récapituler, nous pouvons donc voir les illusions en RV comme des systèmes adaptatifs dont les AIM peuvent s'affranchir de certaines données d'entrée (comme du contexte ou des tâches, vues en figure 2.2). Cela est possible grâce à deux aspects clefs : 1) l'utilisation comme donnée d'entrée de la connaissance des limites de la perception et de la cognition humaine, et 2) la garantie d'un résultat universel, avec une direction

prévisible et impossible à éviter pour l'humain.

Cette thèse ne propose pas d'illusions au sens strict des définitions fournies ici. Cependant ce domaine a constitué une source d'inspiration importante lors de la conception de nos interfaces et de nos systèmes adaptatifs, notamment concernant la capacité à s'affranchir de certaines données d'entrée habituellement nécessaires pour les AIM.

2.3.3 L'augmentation cognitive

Raisamo et al. (2019) définissent l'augmentation humaine comme étant une discipline interdisciplinaire qui cherche les méthodes, les technologies et leurs applications visant à améliorer les capacités sensorielles, motrices ou cognitives humaines. Cet objectif est atteint grâce aux technologies de détection, de l'information et d'intelligence artificielle. Directement lié à cette définition, les auteurs divisent le domaine en trois axes de recherche chacun dédiée à un type d'augmentation : (1) l'augmentation sensorielle, qui comprend l'augmentation de la vision, de l'audition, des sensations haptiques, de l'odorat et du goût ; (2) l'augmentation de l'action, qui comprend l'augmentation de la motricité, l'amplification de la force et du mouvement, la saisie de la parole, les commandes basées sur le regard et la téléopération ; (3) l'augmentation de la cognition, qui comprend l'extension de la mémoire et l'amélioration de la prise d'information. Dans cette thèse nous nous intéressons uniquement au troisième type d'augmentation que les auteurs définissent comme :

> **Augmentation cognitive**
> L'augmentation cognitive est obtenue par détection de l'état cognitif de l'humain, en utilisant des outils analytiques pour l'interpréter correctement et en adaptant la réponse du système aux besoins actuels et prévisionnels de l'utilisateur (par exemple, en fournissant des informations stockées ou enregistrées au cours d'une interaction naturelle).

La définition de l'augmentation humaine a été complétée ensuite plusieurs fois, notamment afin d'ajouter un quatrième type, l'augmentation sociale et la notion de degré d'aide fournie (allant d'une copie des capacités humaines, à une complétion ou à une amélioration exceptionnelle) (De Boeck & Vaes, 2021 ; Felicini & Mortara, 2023). Felicini et Mortara (2023) proposent une taxonomie spécifique aux augmentation cognitives, apportant encore plus de précision théorique au domaine.

Comme le soulève Kozhevnikov et al. (2018), peu de recherches s'intéressent précisément à l'existence et aux sources de cet état d'augmentation cognitive. D'après eux, en dehors de la théorie sur le sujet, il est difficile de mettre en place des systèmes concrets qui génèrent temporairement ce qu'ils appellent des états cognitifs améliorés (« Enhanced Cognitive States » en anglais - ECS).

Pourtant, il existe des exemples comme dans la recherche sur le *Flow*, cette sensation que les gens ressentent lorsqu'ils agissent avec une implication totale (Csikszentmihalyi, 2000). La plupart des recherches visent à générer cet état et le maintenir. Certains

chercheurs ont notamment quantifié les indicateurs physiologiques d'un état de *Flow* (BIAN et al., 2016 ; NORSWORTHY et al., 2021, 2023), le lien entre le *Flow* et les styles cognitifs (BIAN et al., 2020), le lien avec l'incarnation (BIAN et al., 2023) ou encore le lien avec la difficulté (LEMMENS & VON MÜNCHHAUSEN, 2023).

À titre de comparaison avec le *Flow*, peu d'études examinent en détail l'augmentation d'autres états cognitifs. KOZHEVNIKOV et al. (2018) ont développé une méthodologie visant à évaluer l'existence de ces ECS en analysant la performance des utilisateurs lors du « attentional blink test » (voir (SHAPIRO et al., 1997) et la sous-section 4.3.2 pour plus de détails sur cette méthode). Les auteurs mettent ainsi en évidence que cet état est temporaire et, à l'instar du *Flow*, devient particulièrement manifeste lorsque le niveau de difficulté est optimal. Dans d'autres travaux, KOZHEVNIKOV (2022) met en évidence le lien entre les ECS et le type de jeu vidéo (et donc d'expérience) ayant induit ces états.

De plus, LI et al. (2020) montrent que les capacités d'attention sélective, définie ici comme la capacité d'une personne à allouer correctement ses ressources attentionnelles à un stimulus pertinent ou à ignorer un stimulus non pertinent, sont significativement améliorées lors de l'utilisation d'un système de RV en comparaison avec un système 2D.

Pour résumer, l'augmentation humaine est un sujet très vaste et au sein de ce domaine, l'augmentation cognitive propose un cadre assez précis mais peu de diversité de mise en pratique. Le *Flow* est un état très étudié mais d'autres états cognitifs font désormais l'objet de recherches détaillées, particulièrement l'attention. Nous pouvons constater que l'augmentation cognitive est une forme d'adaptation que réalise l'humain face a une stimulation qui respecte certains critères (niveau de difficulté adapté, dispositifs menant à l'interaction, incarnation forte, etc) mais aussi du à des caractéristiques personnelles (style cognitif). Cette vision de l'augmentation permet de créer des situations où l'humain améliore ses capacités cognitives, le menant à un état d'interaction différent avec son environnement.

2.3.4 Approche de design centrée super-pouvoirs

La question de l'autonomisation (« empowerment » en anglais, que l'on peut définir comme le fait de se rendre autonome, de conquérir son autonomie) de l'utilisateur a récemment été soulevée dans le domaine de la visualisation, notamment en soulignant la pertinence de concevoir des systèmes, en particulier immersifs, comme fournisseurs de super-pouvoirs (SADEGHIAN & HASSENZAHL, 2021 ; WILLETT et al., 2022).

Plus précisément, WILLETT et al. (2022) ont construit, d'une part, un cadre théorique pour décrire les super-pouvoirs présentés dans le fantastique et la science-fiction, ainsi que les mécanismes cognitifs chez l'humain qui peuvent être à l'origine de ces super-pouvoirs. D'autre part, ils ont caractérisé l'autonomisation qu'induisent les systèmes de visualisation. Ils mettent en valeur sept dimensions qui caractérisent à quel points ces systèmes fournissent de l'autonomisation : le périmètre, l'accessibilité, la pertinence spatiale, la pertinence temporelle, la richesses des informations, le degré de contrôle disponible, et le niveau de réalité environnementale. Ce faisant, ils mettent en

avant les liens possibles entre les mécanismes cognitifs chez l'humain et les visualisations dans les dispositifs immersifs, à travers le prisme des super-pouvoirs. Si les systèmes permettent l'amélioration des capacités, et que ces capacités sont à la base des super-pouvoirs décrits dans les œuvres de fiction, qu'est-ce que ces systèmes peuvent apprendre des super-pouvoirs ? En utilisant leur cadre théorique, le super-pouvoir de Sherlock Holmes est descriptible par exemple comme une amélioration des 3 processus cognitifs suivants : l'attention, la mémorisation et la comparaison. Ce pouvoir est souvent représenté avec un trope visuel du « Sherlock scan »[1], des visualisations donnant des informations riches, souvent placées proches spatialement du sujet de l'information, ancrées dans le réel, retraçant des informations parfois lointaines temporellement, etc.

Sadeghian et Hassenzahl (2021) dressent un constat similaire et estiment que dans l'ensemble : « même si l'augmentation des capacités humaines au-delà de la normale dans la RV a attiré l'attention des chercheurs ces dernières années, lorsqu'il s'agit d'applications "sérieuses" (non ludiques, non divertissantes), les super-pouvoirs ne sont pas encore largement envisagés ». C'est pourquoi ils proposent un cadre technique pour pouvoir implémenter des super-pouvoirs comme outils d'interaction directement dans Unity afin de les rendre accessibles dans n'importe quelle application de RV conçu avec cet outil. Ils reprennent la classification perception, action et cognition proposée par Raisamo et al. (2019) en terme d'augmentation humaine.

Les super-pouvoirs deviennent ainsi une source d'inspiration importante pour la conception des systèmes de visualisation ayant pour but l'autonomisation des utilisateurs. Ils sont pour l'instant très peu utilisés en dehors du divertissement, et des cadres théoriques concrets commencent à voir le jour pour faciliter leur utilisation.

2.4 Immersive Analytics

L'augmentation du nombre et de la complexité des données dans la recherche contemporaine et l'industrie requièrent des approches innovantes en analyse et en visualisation. L'Immersive Analytics émerge ainsi comme un domaine interdisciplinaire prometteur, répondant à ces défis en repensant l'interaction avec les données à travers des interfaces technologiques avancées, telles que la réalité virtuelle et augmentée, les grandes surfaces tactiles et les techniques d'interaction multisensorielles. Son objectif est de transformer la manière dont les humains analysent et manipulent des ensembles de données complexes. Cela constitue un support immersif particulièrement intéressant à étudier, car il représente un cas où l'interaction entre l'humain et l'environnement virtuel combine à la fois des tâches précises et définies (traitement classique des données) et une exploration libre de l'utilisateur (compréhension et analyse non cadrées des données).

Dans cette section, nous présentons les définitions clefs de l'Immersive Analytics qui, tout en précisant les contours du domaine, soulignent également sa nature interdisciplinaire, à l'intersection de la visualisation de données, de l'IHM, de l'infor-

1. https://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php/Main/SherlockScan, Date de dernière consultation le : 05/12/2024

matique graphique et des technologies immersives. Nous abordons ensuite les défis majeurs identifiés dans la littérature, tels que la collaboration, la gestion de l'espace, ou encore l'évaluation des systèmes immersifs. Ces défis ouvrent des perspectives de recherche, mais révèlent également les limites actuelles des solutions existantes. Enfin, nous montrons comment les questionnements soulevés par ces travaux offrent des cas d'usage concrets pour la RV adaptative, notamment en ce qui concerne l'assistance de l'utilisateur dans ses tâches d'analyse et l'évolution des processus analytiques grâce à l'immersion. Dans cette thèse, nous exploitons l'Immersive Analytics comme un terrain d'expérimentation pour l'étude de l'adaptation avancée en RV.

2.4.1 Définition de l'Immersive Analytics

Les méthodes de visualisation en 2D présentent des limitations significatives en termes de perception et de compréhension, en particulier lorsqu'il s'agit de traiter des jeux de données multidimensionnels complexes. Par exemple, le travail de Boger et al. (2021) illustre ces limites : lors d'une tâche d'analyse de données en deux dimensions, les participants deviennent aveugles à certains aspects, bien que ceux-ci soient pourtant évidents à percevoir (ici des dessins simples que forment les données). Ce résultat met également en évidence l'influence du support d'interaction sur la manière dont les utilisateurs explorent et interprètent les données.

La 3D offrant un support d'interaction différent, la question de comment visualiser des données multidimensionnelles s'est donc posé et a donné lieu à de nouveaux domaines de recherche. En particulier, le domaine de la visualisation située (« Situated visualization » en anglais) s'intéresse à l'utilisation de l'espace en trois dimensions comme nouveau paradigme de visualisation. Ce domaine cherche à repenser l'espace autour de l'utilisateur et se différencie des approches 3D plus classiques visualisées sur un écran. Une visualisation située est donc définie pour la première fois par (White & Feiner, 2009) comme étant une visualisation qui est liée à son environnement et qui s'y affiche. Des questionnements se posent sur l'utilisation d'objets physiques afin de représenter ces données : par exemple, Hurtienne et al. (2020) ont utilisé un vélo afin de faire produire à l'utilisateur, en pédalant, l'énergie nécessaire à leur recherche Google (voir Offenhuber (2020) pour d'autres exemples ainsi qu'une classification de ceux-ci). Bressa et al. (2021) ont réalisé une revue systématique de la littérature sur le sujet, permettant de mettre en avant que la mise en situation dans l'espace des données ne se résume pas à la position spatiale mais doit aussi être abordée en tenant compte de quatre autres perspectives :

- La position temporelle, qui marque la distance entre le moment de la visualisation et le temps auquel les données font référence.
- La lieu, qui marque la cohérence et l'interaction entre la visualisation et l'environnement dans lequel elle est placée.
- L'activité, qui marque l'adaptation dont doit faire preuve la visualisation à l'objectif ou à la tâche que l'humain souhaite réaliser.
- La communauté, qui marque l'adaptation dont doit faire preuve la visualisation aux communautés ou groupes sociaux dont sont issus les utilisateurs et les

concepteurs.

L'ensemble de ces questionnements, bien qu'évoqués majoritairement pour des visualisations qui prennent place dans des environnements réels, peuvent cependant se transférer au cas des environnements virtuels. Par exemple, Danyluk et al. (2020) font la comparaison directe entre l'interaction avec des visualisation physiques et l'interaction avec des représentations similaires mais en RV . De même, l'utilisation de dispositifs immersifs pour des tâches de clustering se révèle prometteuse et permettrait d'avoir de meilleurs résultats qu'en 2D, permettant des taux d'erreurs plus faibles d'après Kraus et al. (2020).

Tous ces travaux concernant l'utilisation de l'espace lié à l'utilisateur pour les visualisations, et les parallèles possible avec la réalité virtuelle et augmentée, ont permis l'essor d'un domaine, l'Immersive Analytics. C'est un domaine de recherche qui a été définit par Chandler et al. (2015) comme étant le domaine qui « étudie comment les nouvelles technologies d'interaction et d'affichage peuvent être utilisées pour soutenir le raisonnement analytique et la prise de décision. » Les auteurs précisent aussi que l'objectif est de « fournir des interfaces multisensorielles pour les approches analytiques qui favorisent la collaboration et permettent aux utilisateurs de s'immerger dans leurs données ». Les auteurs mettent aussi en avant dans leur définition une liste d'exemples de technologie typiques du domaine « telles que les grandes surfaces tactiles, les environnements immersifs de réalité virtuelle et augmentée, les affichages haptiques et audio, et les techniques de fabrication modernes. » Cette définition a ensuite été précisé par Dwyer et al. (2018) dans un livre fondateur « Immersive Analytics » de la manière suivante : « L'Immersive Analytics consiste en l'utilisation d'outils d'incarnation et d'engagement, pour faciliter la compréhension des données et la prise de décision. »

Nous allons utiliser dans cette thèse la définition de Skarbez et al. (2019) :

> **Immersive Analytics**
> Nous définissons l'Immersive Analytics comme la science du raisonnement analytique [assisté par ordinateur], facilité par des interfaces humain-machine immersives.

Cette dernière définition englobe de façon concise les concepts clefs des deux définitions précédentes. Elle garde la mise en avant du raisonnement analytique de l'humain de la définition de Chandler et al. (2015), tout en définissant de manière exhaustive les outils technologiques (actuels et à venir) qui permettent l'assistance comme le fait la définition de Dwyer et al. (2018). Ainsi, nous comprenons immédiatement que ce domaine regroupe des chercheurs en sciences cognitives, en visualisation de données, en IHM, en informatique graphique et en réalité virtuelle et augmentée.

Les définitions de l'Immersive Analytics et du domaine de la visualisation située mettent en évidence les défis liés à la représentation et à l'exploration de données dans un espace 3D et en RV. Les questions de comment l'humain interagit avec son environnement et de comment les visualisations sont conçues et adaptées sont primordiales. Nous voyons ici que l'Immersive Analytics devient un cas d'usage complexe très intéressant et pertinent vis-à-vis des questions de recherche sur l'adaptation en RV.

Cette pertinence est encore accentuée lorsque l'on considère les enjeux à venir soulevés par les chercheurs dans ce domaine.

2.4.2 Les défis à relever

Les travaux réalisés dans le domaine de l'Immersive Analytics portent principalement sur la conception de visualisations immersives dédiées à l'accomplissement d'une ou de plusieurs tâches précises d'analyse de données. Par exemple, CORDEIL et al. (2019) ont développé un framework visant à fournir un accès à des routines standards, des visualisations prédéfinies et des outils permettant de concevoir des visualisations plus complexes. Parmis ces outils nous pouvons noter ImAxes, un cylindre physique, manipulable, qui incarne des données selon un axe et qui modifie la visualisation en fonction des autres axes présents aux alentour (CORDEIL et al., 2017). BATCH et al. (2020) ont montré que des experts utilisant un système d'Immersive Analytics ont davantage utilisé l'espace dans l'environnement lorsqu'ils ont présenté leurs visualisations, et ont utilisé moins d'espace lors de la création et la conception de ces visualisations. Ils ont mis en avant une utilisation différente de l'espace en fonction du type de tâche entreprise par les utilisateurs.

De nombreuses avancées dans le domaine ont été synthétisées par DWYER et al. (2020) dans un article retraçant l'évolution du domaine selon plusieurs axes clefs, tels que l'immersion, l'interaction et l'interaction tangible, la représentation, le processus de création, etc. Trois articles clefs dressent un état des lieux des défis auxquels sont confrontés les chercheurs dans ce domaine. SKARBEZ et al. (2019) ont proposé une définition claire du domaine et ont mis l'accent sur cinq axes de recherche. Ces axes ont ensuite été affinés en dix-neuf défis plus spécifiques par ENS et al. (2021), couvrant des questionnements liés à l'interaction avec les systèmes, la collaboration, la gestion de l'espace, l'évaluation, la construction de scénarios et l'IHM. FONNET et PRIE (2021) ont réalisé une revue de la littérature et ont classifié de nombreux articles du domaine afin d'identifier les caractéristiques des systèmes utilisés. Leurs conclusions montrent que ces systèmes intègrent rarement l'audio et encore moins les retours haptiques (DANYLUK et al., 2020). De même, la cybercinétose est peu prise en compte, et la collaboration n'a jusqu'à présent pas occupé une place centrale dans les recherches.

Les méthodes d'interaction, quant à elles, ont fait l'objet de nombreuses explorations, révélant des approches ingénieuses pour manipuler les données. Ces approches incluent, par exemple, l'utilisation des trajectoires (KLOIBER et al., 2020), des gestuelles spécifiques aux mains et aux pieds (AUSTIN et al., 2020 ; WAGNER et al., 2021), la gestion de l'espace (LISLE et al., 2021), ainsi que des visualisations adaptatives (Y. YANG et al., 2020). Une revue complète des techniques d'interaction en Immersive Analytics, réalisée récemment par SPITTLE et al. (2022), retrace l'évolution de ces méthodes.

2.4.3 Un cas d'usage proche des difficultés réelles

Deux défis majeurs soulevés par la littérature concernent : (i) la collaboration entre l'intelligence humaine et l'intelligence du système ; (ii) l'évolution du processus analytique induite par l'immersion (ENS et al., 2021 ; SKARBEZ et al., 2019 ; VICTORELLI

et al., 2020). Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans ces deux axes de recherche.

Concernant le premier aspect, Skarbez et al. (2019) classifient les systèmes d'Immersive Analytics selon deux axes, un pour la recherche d'information et son acteur principal (ordinateur ou humain) et l'autre pour la formulation d'hypothèses et son acteur principal (ordinateur ou humain). De cette classification émerge une catégorie spécifique, que les auteurs désignent comme « système d'analyse où l'ordinateur assiste l'humain ». Cette réflexion, centrée sur l'analyse de données, ne prend pas en compte les capacités intrinsèques du système. Dans cette thèse, nous explorons le lien entre cette problématique et les enjeux liés à la RV adaptative. Cela soulève des questions telles que : *comment un système de RV adaptative peut-il assister un humain dans sa recherche d'informations ou la formulation d'hypothèses ? Le système adaptatif peut-il fournir une assistance sans connaissance a priori de l'objectif de l'utilisateur ?*

Concernant le second aspect, Skarbez et al. (2019) soulèvent, entre autres, les questions suivantes : *comment l'Immersive Analytics peut-elle être utilisée pour améliorer la rigueur et la rationalité de l'analyse ? L'Immersive Analytics peut-elle fournir des méthodes qui améliorent les capacités de réflexion ?* Une fois encore, établir un lien clair entre ces interrogations et les problématiques actuelles de la RV adaptative permet d'identifier des cas d'usage pertinents et prometteurs.

Comme nous le verrons en chapitre 4, en utilisant l'Immersive Analytics comme cas d'étude pour nos recherches en RV adaptative, nous allons donner des premières réponses à ces questions en proposant de nouvelles approches d'adaptation de l'environnement virtuel.

2.5 Espace de classification des systèmes de RV adaptative

À l'issue de notre état de l'art sur l'adaptation en RV, plusieurs constats émergent :

- L'adaptation en RV se fait quasiment toujours via des boucles de rétroactions.
- Il y a une grande variabilité sur les cas d'usages des systèmes adaptatifs, l'impact des adaptations mises en place ou même les façons de les structurer.
- Les entrées exploitées par ces systèmes sont complexes à définir. Cependant, les modèles de connaissances utilisés peuvent être classés en trois grandes catégories : (i) ceux relatifs à l'humain, (ii) ceux liés à la tâche de l'humain, (iii) ceux décrivant le contexte, (l'environnement logiciel et/ou matériel).
- Les connaissances a priori du système adaptatif concernant les tâches de l'utilisateur sont presque systématiquement incluse dans la conception de l'adaptation.
- Chez l'humain, la cognition repose sur de multiples processus, chacun présentant des limites pouvant être exploitées, tant positivement que négativement.
- Il est possible d'améliorer de façon significative les capacités cognitives humaines, et ceci via des choix de conception des systèmes adaptatifs.
- Les illusions sont des sources d'inspirations intéressantes car elles peuvent être vues comme des mécanismes d'adaptations locaux qui peuvent s'affranchir des tâches de l'utilisateur pour fournir un résultat fixe et connu à l'avance.
- Certains domaines de recherche comme l'Immersive Analytics présentent des défis pour le futur qui peuvent être abordés sous l'angle de l'énaction et de la co-adaptation entre l'environnement virtuel et l'humain.

Dans cette section, nous proposons une classification des systèmes de RV adaptative, fondée sur ces constats et articulée autour de trois axes :

1. le niveau d'assistance fourni par le système (HELP LEVEL),
2. le niveau de connaissance du système sur les tâches de l'utilisateur (TASK AWARENESS),
3. le niveau de contrôle exercé par l'utilisateur sur les AIM (USER DOMINANCE).

L'objectif est de proposer une description des systèmes adaptatifs en RV et d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : *comment caractériser un système de RV adaptative ? Comment explorer de nouveaux usages de la RV adaptative ?*

La RV étant définie par l'interaction qu'elle offre à l'utilisateur, ainsi que par la cohérence de son environnement virtuel (voir la sous-section 2.1.1), il nous semble important d'avoir un axe représentant chacun de ces deux aspects de la définition, respectivement USER DOMINANCE et HELP LEVEL. Si l'on considère les modèles de connaissances nécessaires à l'élaboration d'un système de RV adaptatif (cf. figure 2.2), ceux liés à l'utilisateur et au contexte sont encore une fois en lien direct avec les deux aspects majeurs de la définition. Cependant, nous avons observé que le modèle de connaissance

des tâches de l'utilisateur est rarement remis en question par la littérature et constitue le type d'entrée des AIM le moins explicite dans la définition des EVI. C'est pourquoi nous proposons d'introduire TASK AWARENESS, afin d'expliciter que le système adaptatif peut gérer des informations partielles ou inexistantes sur les tâches de l'utilisateur. Par ailleurs, nous ne souhaitons pas classifier les systèmes en fonction des dispositifs matériels concrets (nombre de données physiologiques accessibles, fréquence des captations, etc.), bien que ces aspects puissent donner une indication sur les capacités du système. Ces technologies étant amenées à évoluer, elles ne reflètent pas directement les objectifs du système ou de ses concepteurs. De plus, une telle classification impliquerait d'inclure les technologies de réalité augmentée et mixtes, conduisant à une approche plus générale au sein du *reality-virtuality continuum* de MILGRAM et KISHINO (1994), ce qui dépasse le périmètre de cette thèse. Nous renvoyons aux travaux de FLAVIÁN et al. (2019) pour une classification centrée sur les dispositifs d'incarnation, de présence et d'interaction. Bien que nous nous focalisions sur l'adaptation logicielle en RV, notre classification reste complémentaire à la leur et n'entre pas en conflit pour décrire les systèmes.

Nous allons maintenant présenter les trois axes, HELP LEVEL, TASK AWARENESS et USER DOMINANCE. Pour chacun de ces trois axes de cette classification, nous détaillons l'axe et les caractéristiques des systèmes adaptatifs permettant le placement sur cet axe. Dans la suite de ce chapitre, nous utilisons les termes « système adaptatif » ou « adaptation » pour parler de l'ensemble des composants (ou des AIM) qui permettent la mise en place d'une adaptation à l'utilisateur au sein du système de RV. Le terme système seul fait donc a priori référence à l'ensemble du système de RV, incluant les composants adaptatif et non adaptatifs.

2.5.1 Le niveau d'assistance fourni par le système

Que représente cet axe ?

Le niveau d'assistance d'une adaptation permet de mettre en avant l'objectif pour lequel cette adaptation a été conçu.

Les concepteurs produisent parfois des adaptations automatiques permettant explicitement de faire avancer l'utilisateur dans ses tâches (*e.g.* (FRICOTEAUX et al., 2014 ; TSIAKAS et al., 2015), voir (ZAHABI & ABDUL RAZAK, 2020 ; ZUKI et al., 2022) pour un état de l'art de ce type de systèmes et la sous-section 2.1.2 pour plus de détails). Mais certaines adaptations sont plus subtiles et ont un objectif plus réduit, que l'on pourrait qualifier de cohérence environnementale. Elles peuvent avoir pour but d'améliorer l'expérience utilisateur en général (*e.g.*, les illusions (sous-section 2.3.2) ; ou même prendre la forme de dispositifs hybrides - matériel et logiciel - pour pousser le réalisme comme le font CHENG et al. (2017) et GONZALEZ et al. (2020)) ; ou encore d'induire un état émotionnel particulier (voir la section 2.3 pour plus de détails). Enfin, certains systèmes adaptatifs peuvent chercher à nuire à l'utilisateur ou volontairement être des distractions (*e.g.* le système de FRICOTEAUX et al. (2014) peut intentionnellement prendre la décision de perturber la navigation ; ou encore BONNAIL et al. (2023) et TSENG et al. (2022) détaillent les dérives possibles des adaptations).

Afin de clarifier au maximum le périmètre de cet axe, nous souhaitons définir clairement le terme « système d'aide ». FISCHER (2001) décrit les systèmes d'aide comme des systèmes qui mettent en évidence les fonctionnalités utiles pour les tâches de l'utilisateur et qui l'aident à éviter de se retrouver bloqué. Afin d'intégrer cette définition dans notre contexte de RV adaptative et de minimiser l'accent mis sur les tâches de l'utilisateur, nous proposons une nouvelle définition d'un système d'aide, que nous adopterons tout au long de cette thèse :

> **SYSTÈME D'AIDE**
> Un système d'aide est un système mettant en œuvre des AIM générant des feedback afin de soutenir l'objectif, la tâche ou l'action actuelle de l'utilisateur.

Le système d'aide constitue une sous-catégorie des systèmes adaptatifs en RV, visant à combiner l'intelligence humaine et informatique pour fournir une assistance pertinente. Toutefois, toutes les adaptations ne relèvent pas des systèmes d'aide. Par exemple, certaines adaptations malveillantes, évoquées précédemment, ne peuvent être considérées comme telles.

A quoi ressembleront les systèmes classés sur cet axe ?
Nous proposons donc un axe intitulé **HELP LEVEL**, niveau d'assistance en français, contenant à ses deux extrémités des HELP SYSTEM et des DISTURBING SYSTEM. Nous présentons quelques exemples théoriques de systèmes adaptatifs qui pourraient se placer le long de cet axe :

- HELP SYSTEM : l'un des extrêmes de cet axe regroupe les systèmes adaptatifs offrant le plus d'assistance à l'utilisateur. Cela peut se manifester, par exemple, par une exposition explicite de la solution à la tâche à accomplir, par la mise en avant d'un objet spécifique avec lequel interagir, ou encore par la fourniture d'interfaces détaillant précisément comment effectuer une action au moment opportun.
- DISTURBING SYSTEM : à l'autre extrême, on trouve les systèmes adaptatifs visant à entraver au maximum les actions de l'utilisateur. Cela peut se traduire, par exemple, par une augmentation de la difficulté de la tâche, par une modification des codes habituels de l'environnement (systèmes d'interaction, lois physiques, etc.), ou encore par la conception de systèmes adaptatifs volontairement malveillants (voir (TSENG et al., 2022) pour plus de détails sur ce dernier point).
- Entre ces deux extrêmes se situent les systèmes adaptatifs qui ne visent pas à fournir une aide directe, mais contribuent principalement au réalisme, à la cohérence et aux règles régissant l'environnement virtuel et ses interactions.

2.5.2 Le niveau de connaissance du système sur les tâches de l'utilisateur

Que représente cet axe ?
Le niveau de connaissance du système adaptatif concernant les tâches de l'utilisateur permet de mettre en avant une forme de degré d'expertise de ce système.

Les systèmes reposant sur la connaissance des tâches et nécessitant cette information pour fournir une assistance adaptative sont largement utilisés (voir la section 2.1). Toutefois, dans certains domaines tels que l'exploration de données, où les objectifs des utilisateurs ne sont pas facilement connus à l'avance, les approches basées sur les tâches présentent des limites. Ce défi de collaboration entre l'intelligence du système et l'intelligence humaine, dans un contexte d'informations partielles, est particulièrement prononcé en Immersive Analytics (voir la section 2.4). Pour compenser l'absence de connaissance explicite des tâches, les concepteurs s'appuient souvent sur des connaissances d'experts (Hoover & Winer, 2021) ou sur des données physiologiques issues d'un système complexe de capteurs (Bian et al., 2016 ; Luong et al., 2022) pour concevoir leur système adaptatif. Ces approches consistent à inférer la tâche qu'un utilisateur souhaite accomplir en se basant soit sur l'expertise humaine, soit sur les signaux fournis par les capteurs, puis à intégrer cette tâche inférée comme connaissance explicite dans la structure de l'AIM. Même s'ils surmontent certains des problèmes des approches basées sur les tâches, les systèmes adaptatifs conçus de cette manière sont toujours limités à une liste prédéfinie de tâches qu'ils ont appris à reconnaître en temps réel. Afin de mettre en avant une approche complémentaire, nous définissons la notion de systèmes adaptatifs *task-blind*, aveugle à la tâche en français :

> **Système task-blind**
> Un système task-blind est un système de RV adaptative qui n'utilise aucune connaissance, a priori ou déduite en temps réel, des tâches de l'utilisateur.

Cette approche pourrait surmonter les limitations des méthodes plus classiques. Par exemple, dans un contexte d'Immersive Analytics, un tel système pourrait assister les utilisateurs en mettant en évidence des éléments de l'environnement qu'ils auraient pu négliger lors de l'exploration, ou en soulignant des éléments similaires à ceux qu'ils ont fréquemment observés. De manière plus générale, les systèmes task-blind pourraient fournir des informations précieuses et offrir une assistance quel que soit l'objectif poursuivi par l'utilisateur dans l'environnement.

A quoi ressembleront les systèmes classés sur cet axe ?
Nous proposons donc un axe intitulé **task awareness**, connaissance des tâches en français, contenant à ses deux extrémités des systèmes task-aware et task-blind. Nous présentons quelques exemples théoriques de systèmes adaptatifs qui pourraient se placer le long de cet axe :

- task-aware : l'un des extrêmes de cet axe regroupe les systèmes adaptatifs possédant une connaissance détaillée des tâches de l'utilisateur, des étapes à réaliser, de leur ordre d'exécution, ainsi que de l'ensemble des solutions aux problèmes posés par l'environnement virtuel. Cette approche peut être mise en œuvre, par exemple, à l'aide de systèmes d'ontologies, de modèles sémantiques ou encore de connaissances intégrées directement dans le système.
- task-blind : à l'autre extrême, on trouve les systèmes adaptatifs qui ne disposent d'aucune connaissance des tâches de l'utilisateur et ne cherchent aucunement à les inférer. Cette approche peut être mise en œuvre, par exemple, en utilisant

des systèmes visant à fournir une augmentation cognitive ou en participant uniquement à la cohérence de l'environnement virtuel et de ses interactions.

- Entre ces deux extrêmes, on trouve les systèmes adaptatifs disposant d'une connaissance partielle des tâches de l'utilisateur, ou ceux qui ne possèdent aucune information a priori mais cherchent à les inférer en temps réel.

2.5.3 Le niveau de contrôle exercé par l'utilisateur sur les AIM

Que représente cet axe ?
Le degré de contrôle de l'utilisateur sur le système et ses AIM permet de mettre en avant les caractéristiques de l'interaction entre l'humain et le système.

La manière dont un utilisateur peut interagir avec un système influence la façon dont il perçoit son expérience. Les conséquences de ces interactions se mesurent en terme d'immersion, de perception, de performance et de comportements. Un système adaptable va offrir beaucoup plus de liberté d'interaction à l'utilisateur et amène à un engagement différent de celui d'un système adaptatif (Fischer, 2001). Nous avons aussi vu que la façon dont un utilisateur interagit avec le système a un impact direct sur ses capacités cognitives et sur sa perception du système (Bian et al., 2016 ; Csikszentmihalyi, 2000 ; Kozhevnikov et al., 2018). Cela nous permet aussi de distinguer clairement les systèmes adaptatifs qui cherchent à n'engendrer aucune interaction (comme les illusions, où l'utilisateur n'a aucun contrôle sur le AIM), des systèmes où l'utilisateur peut volontairement demander une interaction voir même en créer.

A quoi ressembleront les systèmes classés sur cet axe ?
Nous proposons donc un axe intitulé **user dominance**, contrôle de l'utilisateur en français, contenant à ses deux extrémités des systèmes active et passive. Nous présentons quelques exemples théoriques de systèmes qui pourraient se placer le long de cet axe :

- active : à un extrême de l'axe, on trouve les systèmes adaptatifs offrant une personnalisation complète à l'initiative de l'utilisateur, ainsi que ceux entièrement adaptables à tout moment. Cette flexibilité peut être mise en œuvre, par exemple, via des systèmes paramétrables, où les interfaces ou les agents virtuels associés restent accessibles en permanence dans l'environnement virtuel.

- passive :À l'autre extrême, on trouve les systèmes adaptatifs où l'utilisateur reste totalement passif lors de l'interaction, ainsi que ceux sur lesquels il n'a aucun contrôle, ne pouvant ni les modifier, ni les activer ou les désactiver. Ces systèmes peuvent s'appuyer, par exemple, sur des illusions perceptives, des adaptations liées exclusivement à l'environnement mais impactant indirectement les interactions de l'utilisateur (*e.g.* un cycle jour-nuit), ou encore des mécanismes exploitant des caractéristiques inconscientes de l'humain (*e.g.* tirer parti des saccades oculaires (Sun et al., 2018) ou du clignement attentionnel (Shapiro et al., 1997)).

- Au milieu de cet axe se situent les adaptations explicites du système, sur lesquelles l'utilisateur exerce un contrôle limité. Les interactions conférant une sensation de contrôle modéré incluent, par exemple, la possibilité d'activer ou de désactiver un système, ou encore celle de repositionner un agent dans l'environnement.

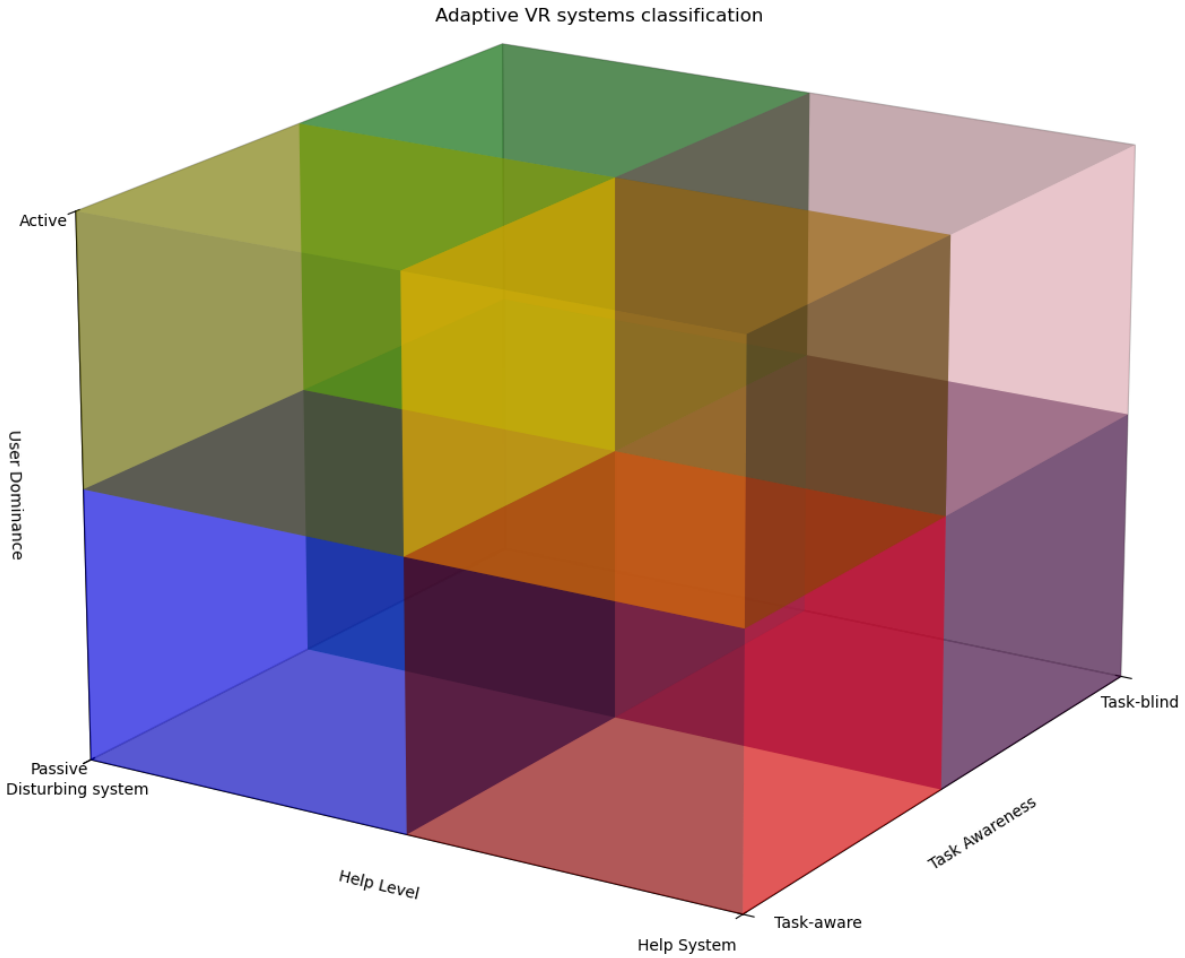


Figure 2.3 – *Graphique représentant notre classification de la RV adaptative. Il permet de dégager huit espaces de catégorisation fournissant un descriptif plus détaillé du domaine.*

2.6 Classification de l'état de l'art

La classification proposée ci-dessus permet de mettre en évidence huit types de systèmes de RV adaptative mis en couleur dans la figure 2.3.

2.6.1 Nomenclature des volumes

Nous observons huit zones continues (représentées ici de façon discrète par souci de simplicité), découpant ainsi le domaine de l'adaptation en RV en grandes catégories.

- Active task-aware help system : en jaune sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant pour objectif d'aider, avec des adaptations activées explicitement par l'utilisateur, et en ayant connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.
- Passive task-aware help system : en rouge sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant pour objectif d'aider, avec des adaptations passives ou indétectables par l'utilisateur, et en ayant connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.

- ACTIVE TASK-BLIND HELP SYSTEM : en rose sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant pour objectif d'aider, avec des adaptations activées explicitement par l'utilisateur, et sans connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.
- PASSIVE TASK-BLIND HELP SYSTEM : en violet sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant pour objectif d'aider, avec des adaptations passives ou indétectables par l'utilisateur, et sans connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.
- ACTIVE TASK-AWARE DISTURBING SYSTEM : en vert clair sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant par exemple l'objectif d'être une perturbation. Ces systèmes intègrent des adaptations activées explicitement par l'utilisateur, et en ayant connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.
- PASSIVE TASK-AWARE DISTURBING SYSTEM : en bleu sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant par exemple l'objectif d'être une perturbation. Ces systèmes intègrent des adaptations passives ou indétectables par l'utilisateur, et en ayant connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.
- ACTIVE TASK-BLIND DISTURBING SYSTEM : en vert foncé sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant par exemple l'objectif d'être une perturbation. Ces systèmes intègrent des adaptations activées explicitement par l'utilisateur, et sans connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.
- PASSIVE TASK-BLIND DISTURBING SYSTEM : en cyan sur la figure, cette catégorie contient les systèmes adaptatifs ayant par exemple l'objectif d'être une perturbation. Ces systèmes intègrent des adaptations passives ou indétectables par l'utilisateur, et sans connaissance des tâches que ce dernier doit accomplir.

Nous remarquons alors que certaines zones correspondent à des domaines présentés sous d'autres mots-clefs. Par exemple les illusions en RV (voir la sous-section 2.3.2 pour plus de détails) sont incluses dans les catégories des PASSIVE TASK-AWARE DISTURBING SYSTEM et PASSIVE TASK-BLIND DISTURBING SYSTEM (respectivement en bleu et cyan dans la figure 2.3). De même, beaucoup le domaine de la RV « *contex-aware* » (voir la sous-section 2.1.3 pour plus de détails) est inclus dans les catégories des ACTIVE TASK-AWARE HELP SYSTEM et PASSIVE TASK-AWARE HELP SYSTEM (respectivement en jaune et en rouge dans la figure 2.3). Ou encore, les systèmes adaptatifs liés à la formation (voir la sous-section 2.1.2) sont pour la plupart inclus dans les catégories des PASSIVE TASK-AWARE HELP SYSTEM et PASSIVE TASK-AWARE DISTURBING SYSTEM (respectivement en rouge et bleu dans la figure 2.3).

2.6.2 Positionnement des travaux et densité des volumes

Dans cette section, nous exploitons cette classification afin d'identifier les types d'adaptations les plus et les moins représentés dans les travaux cités au sein de notre revue de la littérature. Notre démarche ici est de présenter une vue d'ensemble, non systématique, des systèmes adaptatif concrètement implémentés dans le domaine. Nos critères de sélection des travaux afin de les placer dans notre espace de classification

sont les suivants :

- Fais partie des travaux cités dans cette thèse.
- Présente un système adaptatif en temps réel en RV.
- Fourni suffisamment de détails sur l'adaptation pour en comprendre les mécanismes de déclenchement, l'objectif et l'intégration dans l'environnement.

Nous n'avons donc pas inclus les travaux théoriques, de définition, de conceptualisation, les revues ou encore les systèmes de RV qui ne présentent pas d'adaptations en temps réel. Les articles ont été positionnés selon les trois axes, en se basant sur la présentation du système adaptatif, la lecture de la méthodologie, des systèmes mis en place dans l'expérience et du contexte dans lequel l'article se place. Ainsi, chaque système adaptatif s'est vu attribué une note comprise entre -1 et 1 afin d'estimer leur position au sein de chaque axe. Pour attribuer ces notes, nous avons utilisé notre modèle de conception de systèmes adaptatifs, que nous présentons en détails par la suite, en sous-section 2.7.1. Pour chaque axe, la note a été attribué en fonction des réponses qu'il a été possible de donner aux questions de conceptions présentées dans ce modèle. Par exemple, une note proche de -1 sur l'axe USER DOMINANCE, indique un système adaptatif où l'utilisateur n'a que de possibilité d'activation, de modification et de personnalisation de l'adaptation (cf. Q.T-User, Q.G-User et Q.I-User de la sous-section 2.7.1). Nous proposons donc ici une notation simple qui permet d'appréhender l'ensemble des travaux les uns par rapport aux autres, sans pour autant atteindre une grande précision de différenciation pour les notes similaires.

L'ensemble de ces notes sont résumés dans le tableau 2.1. Pour clarifier la lecture, les systèmes ont été numérotés dans le tableau 2.1 puis uniquement les numéros ont été placés dans la figure 2.4.

Référence	Numéro	HELP LEVEL	TASK AWARENESS	USER DOMINANCE	Catégorie
ALGHOFAILI et al. (2019)	5	0.9	-0.7	0.33	
AZMANDIAN et al. (2016)	18	0.36	0.57	-0.36	
BAKER et FAIRCLOUGH (2022)	1	-0.12	0.8	-0.33	
BIAN et al. (2020)	21	-0.3	0.4	-0.1	

(*Le tableau continue à la page suivante*)

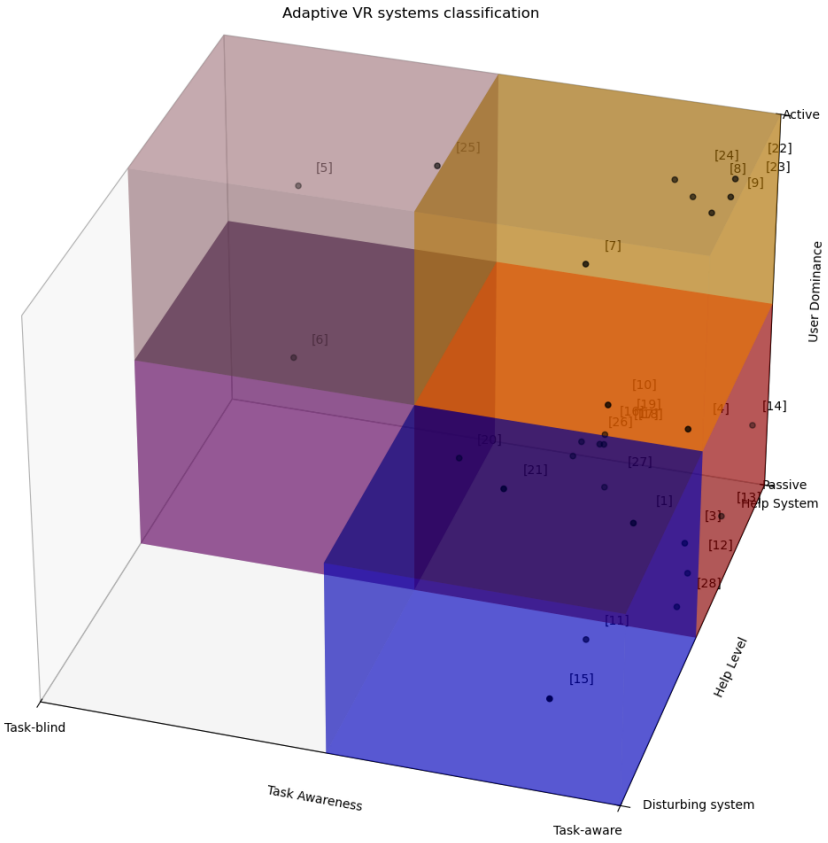
Référence	Numéro	HELP LEVEL	TASK AWARENESS	USER DOMINANCE	Catégorie
CHENG et al. (2017)	26	0.44	0.44	-0.52	
CORDEIL et al. (2019)	22	0.78	0.9	0.8	
CORDEIL et al. (2017)	23	0.72	0.9	0.75	
DENNEMONT et al. (2013)	7	0.33	0.5	0.6	
EL ALI et al. (2023)	11	-0.33	0.7	-0.8	
FRICOTEAUX et al. (2014)	3	0	0.95	-0.5	
GESLAIN et al. (2022)	19	0.41	0.56	-0.35	
GONZALEZ et al. (2020)	27	0.46	0.55	-0.68	
KLOIBER et al. (2020)	24	0.82	0.68	0.72	
KUPIN et al. (2019)	28	0	0.93	-0.85	
LI et al. (2020)	12	0.1	0.94	-0.75	
NARKAR et al. (2024)	6	0.7	-0.66	-0.45	

(*Le tableau continue à la page suivante*)

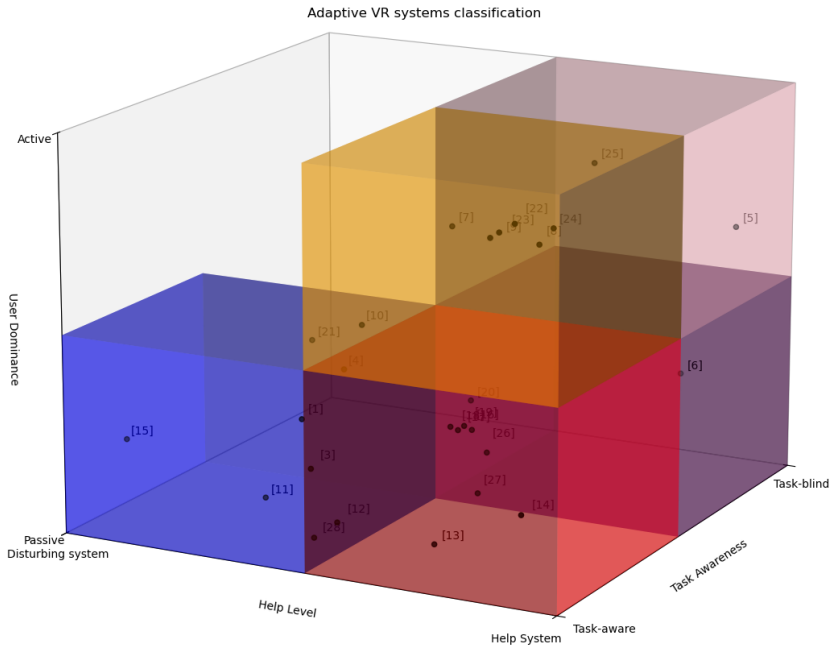
Référence	Numéro	HELP LEVEL	TASK AWARENESS	USER DOMINANCE	Catégorie
Reichherzer et al. (2022)	14	0.85	0.98	-0.55	
Rietzler et al. (2018)	16	0.4	0.48	-0.4	
Rothe et al. (2018)	13	0.5	0.96	-0.77	
Samad et al. (2019)	20	0.2	0.1	-0.42	
Sun et al. (2018)	17	0.38	0.55	-0.38	
Tseng et al. (2022)	15	-0.9	0.73	-0.6	
Tsiakas et al. (2015)	4	0.12	0.92	0	
F.-C. Yang et al. (2024)	10	0.05	0.66	0.12	
Y. Yang et al. (2020)	25	0.6	-0.1	0.78	
Yigitbas et al. (2019)	8	0.8	0.75	0.66	
Zhao et al. (2024)	9	0.66	0.85	0.7	

Table 2.1 – *Liste de tous les systèmes adaptatifs positionnés dans la figure 2.4. Pour chaque référence, un numéro ainsi qu'une note pour chaque axe ont été attribués. La colonne* ***Catégorie*** *rappelle la couleur de la zone dans lequel la référence se trouve une fois les trois notes prises en compte.*

Voici les observations principales que nous pouvons tirer de la figure 2.4 :



(a)



(b)

FIGURE 2.4 – *Classification des recherches du domaine de la RV adaptative présentée par deux vues du même espace 3D. Par souci de lisibilité, les zones ne contenant aucun travaux n'ont pas été représentées (i.e. les zones en vert clair, vert foncé et cyan de la figure 2.3).*

- Il semblerait que les DISTURBING SYSTEM soient peu étudiés, quelque soit le niveau de connaissance de la tâche ou le degré de contrôle de l'utilisateur.
- Il semblerait que la catégorie des systèmes adaptatifs TASK-AWARE soit très étudié. Nous remarquons que ces systèmes sont plutôt des HELP SYSTEM mais semblent être étudiés à des degrés variés de contrôle de l'utilisateur.
- Malgré quelques systèmes qui s'en rapprochent, la catégorie des TASK-BLIND HELP SYSTEM semble très peu étudiée.

Ces remarques basés sur notre méthodologie préliminaire mériteraient toutefois d'être validées par une approche plus systématique, incluant un protocole de type PRISMA (TRICCO et al., 2018) pour la sélection des articles et une formalisation des notes attribuées sur chaque axe.

2.7 Modélisation de la conception des systèmes de RV adaptative

Au vu de toutes nos observations précédentes, nous constatons que le domaine de recherche de la RV adaptative est très vaste et alimente beaucoup de possibilités de recherche. Nous avons vu en section 2.1 que la définition actuelle de la RV adaptative peut être précisée pour prendre explicitement en compte le niveau de connaissance des tâches dans les entrées du système (voir la figure 2.2). Nous avons donc fourni une classification du domaine prenant en compte cet aspect. Cela permet une lecture plus claire des objectifs des systèmes adaptatifs déjà existants, ainsi que des configurations peu étudiées dans la littérature et pouvant ouvrir la voie à de futurs travaux. Cependant, une telle classification, par nature théorique, ne suffit pas toujours car il faudrait aussi des recommandations précises et pratiques sur la conception concrète de telles applications de RV. Pour chaque catégorie vu ci-dessus, les travaux déjà effectués et à venir permettent petit à petit d'extraire les éléments caractéristiques de chaque adaptation et donc d'extraire empiriquement des recommandations de conception.

2.7.1 Présentation de notre modèle

Nous allons voir dans cette section comment notre classification, en plus de proposer une autre lecture permettant d'explorer et de positionner différemment les travaux du domaine les uns par rapport aux autres, permet aussi de structurer la conception de ces adaptations.

Dans leur définition de la RV adaptative, BAKER et FAIRCLOUGH (2022) donnent des précisions sur les AIM et mettent en avant que ces derniers peuvent avoir quatre types de conséquences : sur l'esthétique de la scène, sur la représentation de soi de l'humain, la physique de la scène, et sur les agents virtuels de la scène. Les descriptions de ces catégories donnent des exemples qui aident à visualiser les différentes conséquences de chaque type d'AIM. Les caractéristiques communes (quelque soit la catégorie) des AIM sont aussi évoquées et nous pouvons résumer la construction des AIM à la construction de trois éléments clefs : le critère de déclenchement du mécanisme,

l'objectif de ce mécanisme et son intégration au sein de l'environnement virtuel. C'est à partir de ces caractéristiques et de notre classification que nous allons pouvoir en tirer des recommandations de conception.

La figure 2.5 présente l'évolution que nous proposons à la définition de la RV adaptative. Cette définition, basée sur nos constats concernant la littérature, et nos questions de conception qui l'accompagnent, permettent :

1. de mettre clairement en avant une définition qui questionne la position de la connaissance des tâches.
2. de proposer une lecture de la définition des AIM au sein de celle de la RV adaptative, ce qui permet de donner des recommandations aux concepteurs de ces systèmes.
3. d'associer facilement un système adaptatif conçu ainsi à notre classification.

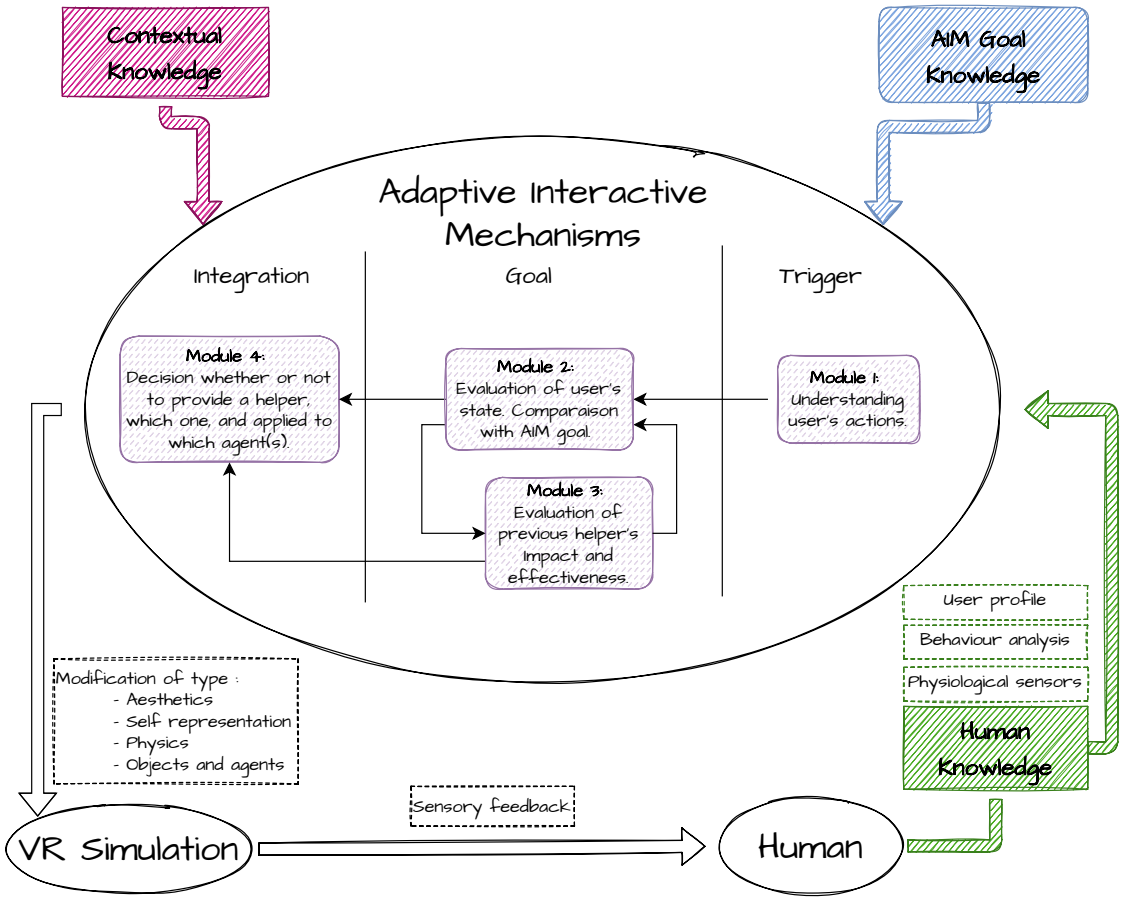


FIGURE 2.5 – *Notre proposition de modèle pour la structure d'un système de RV adaptative. Il met en avant les trois types d'entrées nécessaires : les connaissances contextuelles en haut à gauche en rouge, les connaissances relatives à l'humain en bas à droite en vert, et les connaissances qui définissent l'objectif du système en haut à droit, en bleu. À l'intérieur du système adaptatif, les trois composantes clefs des AIM sont décrite, ainsi que la structure algorithmique des modules qui le compose (en violet).*

La figure 2.5 présente plusieurs modifications par rapport à la figure 2.2, que nous allons passer en revue :

Premièrement, nous avons rajouté au sein du composant « *Adaptive Interactive Mechanisms* » les trois éléments clefs qui les définissent, le déclenchement (« *Trigger* » dans la figure), l'objectif du mécanisme (« *Goal* » dans la figure) et son intégration dans l'environnement (« *Integration* » dans la figure).

Deuxièmement, le composant d'entrée au système lié à la connaissance des tâches à été remplacée par un élément plus général, la connaissance du système adaptatif envers son objectif à accomplir (« AIM Goal Knowledge » dans la figure). Comme nous l'avons vu, ce composant correspond dans la plupart des cas à la connaissance du système envers les tâches de l'utilisateur mais modifié ainsi, cela permet d'avoir une définition plus englobante. Ce composant permet aussi de maintenir l'idée que lors de la conception d'un système adaptatif, il est nécessaire de définir un but (qu'il soit lié aux tâches de l'utilisateur ou non).

Troisièmement, en bas à gauche, nous avons précisé le type d'impact que les AIM ont sur l'environnement (catégorisation à quatre types selon Baker et Fairclough (2022)).

Pour finir, nous avons ajouté une structure en quatre modules afin de disposer d'outils plus concrets pour la conception de tels systèmes. Nous proposons, pour aider à la conception de chaque module, des questions à poser qui permettent de définir le comportement précis des AIM sur chaque dimension. Ces questions sont directement inspirées de notre classification qui sert, en cela, d'outil de structuration et de conception de système adaptatif. Les questions sont les suivantes :

Trigger Pour la dimension lié au déclenchement, nos axes task awareness et user dominance permettent d'établir les questions suivantes :

Q.T-Task ***Comment le système réagit à la progression de l'humain dans ses tâches ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *Il ne réagit pas à l'évolution* », à « *Il déclenche une adaptation à chaque étape de toutes les tâches réalisées* ». Cette question permet de clarifier les caractéristiques du déclenchement des AIM, de préciser le contenu du module 1 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe task awareness.

Q.T-User ***Comment l'humain peut activer une adaptation ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *Une action de sa part déclenche systématiquement une adaptation* », à « *Il ne peut pas activer le système, les adaptations se déclenchent sur des critères comportementaux ou physiologiques* ». Cette question permet de clarifier les caractéristiques du déclenchement des AIM, de préciser le contenu du module 1 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe user dominance.

Goal Pour la dimension lié à l'objectif du système adaptatif, nos trois axes permettent d'établir les questions suivantes :

Q.G-Task ***À quel point le système a besoin de la connaissance des tâches de l'utilisateur pour arriver à son propre objectif ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *Les objectifs du système et de l'humain sont fortement corrélés* », à « *Les objectifs du système et de l'humain sont indépendants* ». Cette question permet de clarifier le but du système adaptatif, de préciser le contenu du module 2 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe TASK AWARENESS.

Q.G-User ***Comment l'humain peut réorganiser le système en cours d'interaction ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *L'humain peut changer l'objectif du système adaptatif via des actions spécifiques* », à « *L'humain n'a aucun impact sur l'objectif du système* ». Cette question permet de clarifier le but du système adaptatif, de préciser le contenu des modules 2 et 3 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe USER DOMINANCE.

Q.G-Help ***Quel impact l'adaptation a-t-elle sur l'expérience utilisateur ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *L'adaptation va beaucoup simplifier l'expérience* » à « *L'adaptation va beaucoup perturber l'expérience* ». Cette question permet de clarifier le but du système adaptatif, de préciser le contenu des modules 2 et 3 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe HELP LEVEL.

Integration Pour la dimension lié à l'intégration des AIM dans l'environnement virtuel, nos trois axes permettent d'établir les questions suivantes :

Q.I-Task ***Quels agents de l'environnement sont importants pour la tâche de l'humain et lesquels sont affectés par l'adaptation ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *Les agents sont les mêmes* », à « *Parmi les agents que l'adaptation affecte, nous ne savons pas lesquels sont utiles aux tâches de l'utilisateur* ». Cette question permet de clarifier l'intégration des AIM, de préciser le contenu du module 4 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe TASK AWARENESS.

Q.I-User ***Comment l'humain peut modifier les interfaces ou le périmètre des agents affectés ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *L'humain peut appliquer ses préférences via des actions spécifiques* », à « *L'humain n'a aucun moyen de personnaliser les adaptations* ». Cette question permet de clarifier l'intégration des AIM, de préciser le contenu du module 4 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe USER DOMINANCE.

Q.I-Help ***Quel impact l'adaptation a-t-elle sur la perception de l'environnement de l'humain ?***

Les réponses peuvent par exemple varier de « *La modification doit*

être immédiatement perçue et l'humain doit y réagir », à « *L'adaptation est imperceptible, la réaction de l'humain doit être inconsciente* ». Cette question permet de clarifier l'intégration des AIM, de préciser le contenu du module 4 (figure 2.5), et de positionner le système sur l'axe HELP LEVEL.

2.7.2 Positionnement et conclusion

Afin de conclure ce chapitre, nous souhaitons ici présenter notre positionnement au sein de notre classification pour le reste des travaux effectués. Nous avons présenté une lecture de la littérature qui nous permet de mettre en avant des pistes de recherches intéressantes et de proposer un modèle général qui sert de cadre de conception de systèmes adaptatifs en RV. Pour la suite de cette thèse, nous utilisons ce cadre de conception afin d'étudier plus en détail des systèmes adaptatifs jusqu'ici peu présents dans la littérature à notre connaissance.

Ainsi, dans cette thèse, nous allons nous intéresser aux systèmes adaptatifs en RV aveugles à la tâche (TASK-BLIND) mais qui fournissent une aide significative sur la performance et le comportement de l'utilisateur (HELP SYSTEM). Plus spécifiquement, ces systèmes, dits HELP SYSTEM TASK-BLIND, se placent au sein des deux zones en rose et en violet sur la figure 2.3, et semblent très peu étudiées pour le moment. Ces zones correspondent pourtant à des situations intéressantes car proches de situation réelles où l'on ne connaît pas toujours l'objectif de l'utilisateur, mais où ce dernier pourrait avoir besoin d'une assistance.

Notre hypothèse est qu'une des raisons qui participe à la sous-exploitation de ces catégories de systèmes adaptatifs, est notamment la façon dont les AIM et la RV adaptative ont été explorés puis définis. C'est pour cela que dans cette thèse, il nous semble important d'avoir, dans un premier temps, clarifié les définitions et d'avoir proposé une classification qui dégage des axes assez peu nommés ou nommés que très récemment.

Lorsque l'on s'intéresse à la partie TASK-BLIND des systèmes adaptatifs, le système n'a alors plus accès à des informations qui lui sont utiles pour chacune des trois dimensions de ses AIM, l'objectif, les déclenchements et l'intégration dans l'environnement. Les réponses aux questions Q.T-Task, Q.G-Task et Q.I-Task (sous-section 2.7.1) ne donnent alors aucune information utile à la conception des AIM. Afin de compenser ce manque de données d'entrée, nous donnons à nos systèmes adaptatifs des objectifs liés aux états cognitifs améliorés (ECS) et au domaine de l'augmentation humaine (sous-section 2.3.3). En ayant cette approche inspirée d'une conception centrée sur les super-pouvoirs (sous-section 2.3.4), l'idée est d'essayer donner de meilleures capacité à l'humain, ce qui l'aidera à mieux faire ce qu'il doit faire, quoique ce soit. En ayant pour but d'avoir un impact sur la cognition et le comportement, il devient ainsi plus facile de répondre aux autres questions (notamment Q.G-Help, Q.T-User et Q.I-Help) et nos systèmes peuvent alors être TASK-BLIND.

Nous présentons dans le chapitre 3 l'utilisation de mécanismes liés à l'attention et la mémorisation pour la réalisation d'un HELP SYSTEM TASK-BLIND, ainsi que son impact

sur la performance et le comportement humain. Dans le chapitre 4, nous détaillons l'utilisation de mécanismes liés à la métacognition pour la réalisation d'un autre HELP SYSTEM TASK-BLIND (dans un contexte d'Immersive Analytics cette fois), ainsi que son impact sur la performance et le comportement humain.

CHAPITRE 3

« RANPO VIRTUAL ENVIRONMENT » : IMPACT SUR LE COMPORTEMENT D'UN SYSTÈME D'AIDE TASK-BLIND LORS DE L'EXPLORATION SPATIALE D'UNE SCÈNE DE CRIME

Sommaire

3.1 Introduction 46
3.2 Conception du système 47
3.2.1 Récupération des données 48
3.2.2 Les systèmes d'aide 49
3.3 Conception de l'expérience 52
3.3.1 Hypothèses 53
3.3.2 Protocole expérimental 54
3.3.3 Participants 55
3.3.4 Procédure 56
3.3.5 Dispositif expérimental 57
3.4 Résultats 61
3.4.1 Méthodologie d'analyse 61
3.4.2 Similarités 61
3.4.3 Différences 64
3.4.4 Analyse du comportement 65
3.5 Discussion 66
3.5.1 Vérification des hypothèses 67
3.5.2 Points de suivi 68
3.6 Conclusion 69

3.1 Introduction

Nous avons vu dans la sous-section 2.7.2 que notre approche task-blind consiste en une solution qui, en utilisant des capteurs simples pour récupérer des données sur le comportement humain, vise à influencer les processus cognitifs plutôt que d'inférer les tâches des utilisateurs. Nous avons également expliqué que, lors de la prise de décision, le cerveau déclenche en permanence des processus cognitifs. Ces derniers correspondent à des actions mentales visant à traiter des connaissances ou des informations sensorielles, et conduisent, par exemple, à la réflexion, la mémoire ou les jugements (POHL, 2022). Cette première étude vise à reconnaître deux processus cognitifs essentiels : l'attention et la mémorisation. Ces processus, largement utilisés pour évaluer l'activité cognitive, sont détaillés dans (LUONG et al., 2022) et dans la section 2.2.

La décision de mettre l'accent sur l'attention et la mémorisation dans notre système d'aide task-blind repose sur plusieurs considérations clefs. Ces deux processus cognitifs fondamentaux sont étroitement liés à l'apprentissage et à la formation de la mémoire (COWAN et al., 2024). En orientant l'attention des utilisateurs vers les éléments pertinents de l'environnement de RV, nous pouvons améliorer leur stratégie d'exploration et leur compréhension de la scène. La mémorisation, quant à elle, joue un rôle crucial dans les tâches nécessitant de se souvenir et d'agir sur des détails spécifiques rencontrés au cours d'une expérience en RV. Favoriser la mémorisation dans un environnement de RV peut aider les utilisateurs à retenir des informations importantes, ce qui rend l'expérience plus significative et plus efficace (voir la section 2.2 pour un approfondissement de ces deux processus cognitifs). Dans le cadre de notre étude, se concentrer sur l'attention et la mémorisation nous permet de créer un système d'aide task-blind capable de soutenir les processus cognitifs des utilisateurs sans nécessiter une connaissance explicite de leurs tâches. En analysant leur comportement, notre approche vise à fournir une assistance cognitive par le biais de feedback sensoriels (KOZHEVNIKOV et al., 2018 ; SADEGHIAN & HASSENZAHL, 2021 ; WILLETT et al., 2022). Ce système aide ainsi les utilisateurs à faire ce qu'ils sont en train de faire, plutôt que directement les aiguiller sur les tâches.

L'une des questions principales de cette thèse est la suivante : *un système de RV adaptative peut-il être conçu pour offrir une assistance en analysant le comportement humain et sans aucune connaissance des objectifs de l'utilisateur ?* Pour commencer à y répondre, nous avons développé un système d'aide task-blind, qui intègre l'activité cognitive de l'utilisateur, en se concentrant particulièrement sur l'attention et la mémorisation. Afin de comparer cette approche à des systèmes d'aide traditionnels basés sur leur connaissance des tâches de l'utilisateur (que l'on nommera souvent « task-aware » dans la suite du chapitre), ainsi qu'à un groupe contrôle sans assistance, nous avons mené une étude avec une installation physiologique légère et peu coûteuse (systèmes de suivi de la tête, des mains et du regard uniquement). Le cas d'usage choisi est celui de la compréhension de scènes de crime, un domaine dans lequel l'utilisation de la RV a déjà fait ses preuves (ENGSTRÖM, 2018) et s'est révélée utile (REICHHERZER et al., 2022). De plus, ce scénario offre la possibilité de définir aisément une solution de référence, permettant de mettre en œuvre et d'évaluer efficacement les deux approches du système d'aide :

avec ou sans connaissance des tâches et de la résolution de l'énigme. Nous évaluons non seulement les performances des utilisateurs (voir la sous-section 3.3.1 pour plus de détails sur l'évaluation), mais nous allons également plus loin en explorant l'impact de la conception des systèmes d'aide sur le comportement et les processus cognitifs des utilisateurs. Nos premiers résultats donnent un aperçu de l'efficacité de cette approche relativement peu explorée lors de la conception en RV adaptative.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : la section 3.2 détaille la conception du système utilisé pour l'expérimentation, incluant la mise en œuvre des systèmes d'aide task-aware et task-blind, ainsi que les méthodes de collecte de données employées. La section 3.3 décrit nos hypothèses, le protocole expérimental, les caractéristiques des participants et les détails de l'installation. La section 3.4 présente les résultats de notre étude, comprenant l'analyse des performances et des données comportementales recueillies. Dans la section 3.5, une discussion de nos résultats vérifie nos hypothèses, identifie les limites et explore les implications potentielles de notre travail. Enfin, la section 3.6 conclut le chapitre en résumant nos contributions, en ouvrant des premières perspectives et en introduisant les orientations retenues pour la deuxième étude de cette thèse.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été valorisé dans le journal Springer Virtual Reality, sous la forme de la publication suivante : Besga et al. (2025)

3.2 Conception du système

Dans cette section, nous décrivons la mise en œuvre de notre cas d'usage : l'exploration d'une scène de cambriolage en RV. Comme le montre la figure 3.1, l'environnement virtuel est un bureau reconstruit en 3D, gracieusement fourni par Reichherzer et al. (2018), dans lequel huit objets ont disparu. Douze marqueurs de délit orange ont été placés dans la scène. Huit d'entre eux indiquent l'emplacement correct des objets volés et les quatre autres sont des leurres. Les participants reçoivent des informations partielles sur cette scène de crime et doivent l'explorer pour comprendre ce qui s'est passé. Il leur est demandé d'explorer librement, de s'approprier la pièce autant que possible et de déterminer où se trouvaient les huit objets volés. Pour indiquer la position qu'ils pensent correcte d'un objet, ils doivent interagir avec le marqueur de délit qui, selon eux, est placé à l'endroit où était l'objet, et affecter l'objet à ce marqueur.

Les participants sont répartis au hasard dans l'un des trois groupes suivants : (1) celui qui ne reçoit aucune aide, (2) celui qui reçoit des aides task-aware et (3) celui qui reçoit des aides task-blind. Pendant cette expérience en RV, nous utilisons le suivi de la tête, des mains et des yeux. Cette configuration de capteurs simple et non invasive est privilégié afin d'éviter des facteurs non contrôlés et des problèmes d'utilisation (comme par exemple, l'utilisation incorrecte de l'activité électrodermale abordée par Babaei et al. (2021)). La vision étant la seule modalité sensorielle considérée dans cette expérience, le terme attention mentionnée dans le reste de ce chapitre se réfère spécifiquement à l'attention visuelle. Cette section décrit plus précisément comment les systèmes d'aide que nous avons construits (respectivement en utilisant des approches task-aware et task-blind) interprètent et exploitent les données collectées auprès des



FIGURE 3.1 – *Le bureau a explorer, reconstruit en RV (même modèle que dans REICHHERZER et al., 2018). Il montre la pièce où un vol a eu lieu.*

utilisateurs.

3.2.1 Récupération des données

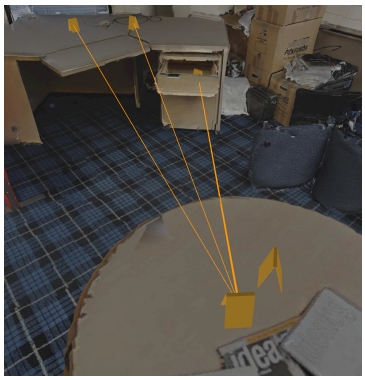
Le système recueille périodiquement des informations sur les mouvements et le comportement des participants, qui sont stockées dans un historique servant de données brutes pour les algorithmes. Afin de mettre en œuvre un système d'aide qui donne un retour visuel au bon moment, nous devons transformer ces données brutes de l'utilisateur en classes d'action que le système peut comprendre. Ces données brutes de l'utilisateur sont donc analysées périodiquement afin de détecter toute nouvelle action effectuée (voir la sous-section 3.3.5 pour les fréquences choisies). Quatre classes d'actions ont été définies :

1. **Actions de NAVIGATION** : déclenchées lorsque les participants effectuent des mouvements significatifs sans viser une zone spécifique de la pièce.
2. **Actions de NAVIGATION VERS** : déclenchées lorsque les participants se déplacent vers une zone spécifique de la pièce, divisée en six zones (voir la figure 3.3). Cette action enregistre la zone atteinte par l'utilisateur.
3. **Actions de COUP D'ŒIL** : déclenchées lorsque les participants regardent un marqueur de délit. Cette action enregistre la cible visée par l'utilisateur.
4. **Actions de CHOIX** : déclenchées chaque fois que les participants interagissent avec un marqueur de délit. Cette action enregistre la saisie effectuée par l'utilisateur.

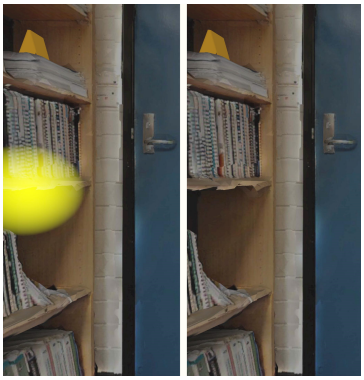
Ces quatre actions ont été sélectionnées parce qu'elles correspondent aux interactions clefs classiques des utilisateurs dans tout environnement virtuel : navigation,



(a) *Un marqueur peut se mettre en surbrillance. Plusieurs marqueurs peuvent se mettre en surbrillance afin d'attirer l'attention sur une zone spécifique.*



(b) *Une ligne orange apparaît, connectant les objets appartenant au même propriétaire.*



(c) *Une lumière qui redirige l'attention vers la gauche ou la droite de l'utilisateur. Elle apparaît dans la vision périphérique et clignote à une fréquence de 10 Hz.*

Figure 3.2 – *Types d'aides visuelles apparaissant dans l'expérience.*

sélection et manipulation (D. Bowman et al., 2004 ; D. A. Bowman & Hodges, 1999). Les actions identifiées sont enregistrées dans un historique distinct, complémentaire à celui des données brutes. Ces deux historiques sont accessibles et servent de base aux autres algorithmes du système.

3.2.2 Les systèmes d'aide

Les aides affichées dans les approches task-aware et task-blind sont identiques et sont présentées dans la figure 3.2. Toutes les aides fournies visent à renforcer les capacités cognitives d'attention et de mémorisation de l'utilisateur. Leur conception graphique s'inspire des pratiques courantes en RV et dans les jeux vidéo (Dillman et al., 2018). Une seule aide est affichée à la fois. Les aides générées par le système sont mises en file d'attente et gérées selon une politique du dernier entré, premier sorti (LIFO). Il existe quatre types d'aides :

1. Une aide de surbrillance (voir la figure 3.2(a)) est utilisée pour attirer l'attention sur un marqueur de délit spécifique, c'est-à-dire l'emplacement d'un objet potentiel.
2. Plusieurs aides de surbrillance sont utilisées pour attirer l'attention sur une zone spécifique de la pièce (par exemple, les marqueurs sur la table ronde dans la figure 3.2(a)).
3. Une aide de lien (voir la figure 3.2(b)) est utilisée pour fournir des informations utiles sur les objets liés. Les participants doivent en déduire que tous les marqueurs reliés par les lignes animées orange correspondent à des objets en relation.
4. Une aide au regard (voir la figure 3.2(c)) utilise une lumière clignotante dans la vision périphérique afin d'induire un changement d'attention et une rotation du participant (Bailey et al., 2009 ; Grogorick et al., 2017).

La décision d'afficher ou non une aide est structurée selon une boucle de perception, décision, action, couramment utilisée par les systèmes adaptatifs en RV (cf. sous-section 2.1.1 et (FUCHS, 2017)). Les différences entre les deux systèmes d'aide résident uniquement dans le calcul du moment, de l'endroit et de la raison de l'affichage d'une aide. Inspirés par l'approche des « smart objects », les deux systèmes d'aide utilisent les informations relatives à chaque objet de la scène. Par exemple, les données collectées incluent la position de l'objet, son éventuelle présence dans le champ de vision, le fait qu'il soit actuellement mis en valeur par une aide, ou encore s'il partage certains éléments avec d'autres objets, etc.

Nous considérons trois variantes de notre système :

SANS AIDE Aucun système d'aide n'est utilisé.

COMPORTEMENT Le système d'aide dispose d'un accès à la connaissance du CONTEXTE et du COMPORTEMENT, *i.e.* aux données représentées en rose foncé et vertes dans la figure 2.2. Système dit task-blind.

TÂCHE Le système d'aide dispose d'un accès à la connaissance du CONTEXTE et des TÂCHE, *i.e.* aux données représentées en rose foncé et rose clair dans la figure 2.2. Afin de comprendre le parcours de l'utilisateur à travers les tâches, cette variante a accès à l'historique des actions de l'utilisateur, mais pas aux modules d'analyse du comportement. Système dit task-aware.

Nous décrivons chaque algorithme du système d'aide plus en détail ci-dessous. Nous avons volontairement mis en œuvre une approche naïve, afin de nous concentrer sur l'effet des approches de conception plutôt que sur la complexité de l'algorithme. Cependant, les deux systèmes suivent le modèle présenté en figure 2.5. Les questions de conceptions associées à ce modèle ont été utilisées pour définir les détails techniques (voir la sous-section 2.7.1). Dans les deux paragraphes qui suivent, à la fin de certaines phrases, la référence à la question à laquelle la phrase répond est mise entre parenthèse. L'utilisateur n'a aucun contrôle sur le déclenchement des aides, quelque soit le système (cf. Q.G-User, Q.I-User)

SYSTÈME D'AIDE COMPORTEMENT

Ce système d'aide est conçu en utilisant une approche task-blind. Par conséquent, le système d'aide ne connaît pas l'emplacement correct des objets volés et fournit une assistance uniquement basée sur le comportement des participants (cf. Q.T-Task, Q.G-Task). Les actions réalisées sont enregistrées par le système d'aide et utilisées pour reconnaître les états et les comportements humains. Les mouvements oculaires et les données comportementales (positions de la tête et des mains, zone de la pièce explorées ou non, interaction avec les objets, etc.) sont interprétés en temps réel. En analysant ces actions en temps réel, le système identifie ce que fait le participant pendant son exploration. L'algorithme, relativement simple, se concentre principalement sur la manière dont le participant explore la pièce (GAGNON et al., 2018). Contrairement au système TÂCHE, aucune aide n'est affichée pendant la première minute d'exploration afin de réduire la charge cognitive initiale (cf. Q.I-Help). L'historique des actions et les données brutes de l'utilisateur (détails dans la sous-section 3.2.1 et la sous-section 3.3.5) sont analysés périodiquement pour déduire un comportement à partir de

cette liste d'actions. Actuellement, ce système d'aide peut identifier six comportements spécifiques :

- (1) si l'utilisateur se concentre sur un marqueur spécifique,
- (2) s'il est perdu,
- (3) s'il ignore une partie de la pièce,
- (4) s'il ignore un objet,
- (5) s'il est physiquement statique,
- ou (6) s'il est visuellement statique.

Pour cela, le système est conçu avec les déclencheurs suivants (cf. Q.T-User) :

- (1) en cas d'actions COUP D'ŒIL successives sur un marqueur,
- (2) en cas de délai trop long depuis les dernières actions NAVIGATION (ou NAVIGATION VERS) et COUP D'ŒIL,
- (3) s'il y a une trop grande différence de visites entre deux zones de la pièce,
- (4) s'il y a une trop grande différence de nombre de COUP D'ŒIL entre deux objets,
- (5) en cas de délai trop long depuis la dernière action NAVIGATION (ou NAVIGATION VERS),
- (6) en cas de délai trop long depuis le dernier COUP D'ŒIL.

Ainsi, ce système a pour objectif d'attirer l'attention (et donc améliorer la mémorisation) avec les adaptations suivantes (cf. Q.G-Help, Q.I-Help) :

- (1) afficher une aide LIEN pour l'objet,
- (2) afficher une aide SURBRILLANCE sur tous les objets de la dernière zone visitée,
- (3) afficher une aide SURBRILLANCE sur tous les objets de la zone ignorée,
- (4) afficher une aide SURBRILLANCE sur l'objet ignoré,
- (5) afficher une aide SURBRILLANCE sur tous les objets de la dernière zone visitée,
- (6) afficher une aide LIEN sur le dernier objet regardé.

Le système d'aide affiche des aides (présentées dans la figure 3.2) afin d'aider le participant dans tous ces cas identifiés. Contrairement au système TÂCHE (et parce qu'il n'y a pas de connaissances préalables sur les tâches, l'objectif de l'utilisateur ou la solution de l'affectation), les aides sont fournies, même si l'utilisateur manifeste de l'intérêt pour des leurres ou des objets non pertinents (cf. Q.I-Task).

SYSTÈME D'AIDE TÂCHE

Ce système d'aide est conçu selon une approche basée sur la connaissance du systèmes envers les tâches de l'utilisateur. Pour notre cas d'utilisation, plusieurs tâches sous-jacentes ont été définies et servent de bloc de connaissances implicites pour le système. Ces tâches sous-jacentes ne sont pas communiquées aux utilisateurs ; elles constituent une traduction interne permettant au système de représenter la mission générale confiée aux utilisateurs. Toutes les tâches sont construites de la même manière, sous la forme « *Marquer* [OBJET VOLÉ] *sur le marqueur de* [POSITION CORRECTE] », sont fournies au système, et se caractérise par une séquence d'actions que les utilisateurs doivent accomplir. Toutes les tâches consistent donc en trois actions :

- (1) regarder le marqueur de [POSITION CORRECTE] ;
- (2) naviguer vers la zone qui correspond à ce marqueur ;

- (3) effectuer le choix [OBJET VOLÉ] sur ce marqueur.

Ces tâches visent à accroître les connaissances sur l'emplacement des objets perdus. Par exemple, pour la statue volée, la tâche est la suivante : « *Marquer la statue volée sur le marqueur de la bibliothèque* ». Et les trois étapes de réalisation de la tâche sont : d'abord, regarder le marqueur de la bibliothèque ; ensuite, naviguer vers la zone d'entrée ; et enfin, effectuer le choix « statue » sur le marqueur. Si le choix effectué sur le marqueur n'est pas le bon, l'étape (3) de la tâche n'est pas validée.

Le système affiche les aides visibles dans la figure 3.2 pour aider le participant à terminer la tâche la plus proche de l'achèvement (cf. Q.G-Task). Les tâches définies concernent exclusivement les huit marqueurs associés aux objets volés. Ici, le système connaît l'emplacement initial des objets volés et se concentre uniquement sur cet aspect pour fournir de l'aide (cf. Q.I-Task). Comme l'utilisateur peut ne pas suivre un ordre précis dans l'exécution des tâches, le système doit interpréter ses intentions et suivre l'étape actuelle de la tâche qu'il est en train d'effectuer. Tous les autres comportements sont ignorés, et l'aide est déterminée uniquement en fonction de l'estimation de la progression de l'utilisateur dans les tâches. Chaque fois qu'une action est détectée (voir la sous-section 3.2.1), le système vérifie si cette action correspond à l'une des actions à réaliser à ce moment là pour une tâche. Si c'est le cas, le degré d'achèvement de cette tâche augmente. Le système fournit alors une nouvelle aide pour la prochaine action de la tâche la plus avancée (cf. Q.T-Task, Q.T-User). La nouvelle aide est sélectionnée en fonction de l'étape suivante à réaliser (cf. Q.G-Help) :

- si la prochaine étape à réaliser est (1), le système va afficher une aide LIEN pour le marqueur [POSITION CORRECTE] de la tâche ;
- si la prochaine étape à réaliser est (2), le système va afficher une aide LIEN sur tous les marqueurs de la zone contenant le marqueur [POSITION CORRECTE] de la tâche ;
- si la prochaine étape à réaliser est (3), le système va afficher une aide LIEN sur le marqueur [POSITION CORRECTE] de la tâche ;

Ce système ne prend pas en charge les tâches qui n'ont pas été définies au préalable dans le bloc de connaissance des tâches. De plus, les aides ne se déclenchent pas pour des objets non pertinents à la résolution de la scène de crime (cf. Q.I-Help).

3.3 Conception de l'expérience

L'objectif principal de cette étude utilisateurs est de comparer les approches task-aware et les approches task-blind sous plusieurs angles. Comme mentionné précédemment, nous avons choisi le cas d'utilisation de l'exploration d'une scène de crime. Le protocole expérimental s'inspire de celui proposé par REICHHERZER et al. (2018) afin d'étudier la mémorisation narrative et la compréhension spatiale des participants dans un environnement en RV. Bien que l'environnement visuel reste identique, les systèmes testée et la méthodologie diffèrent radicalement. Cette section décrit en détail la conception de l'expérience.

3.3.1 Hypothèses

Un vol fictif a eu lieu dans un bureau. Le scénario fournit aux participants de l'expérience est présent en annexe A. Les positions des objets volés et la compréhension du scénario sont définies comme les principaux points d'intérêt guidant l'exploration. Ces points servent à établir les tâches sous-jacentes utilisées dans l'approche task-aware, décrite dans notre système d'aide TÂCHE. Cependant, d'autres aspects, tels que la compréhension spatiale de la pièce et l'attention portée aux détails, sont également évalués, bien qu'ils ne soient pas directement liés aux principaux points d'intérêt. Par ailleurs, l'expérience utilisateur, incluant des dimensions importantes comme le sentiment de présence, l'immersion et les ressentis émotionnels, est également prise en compte. Dans cette étude, tous les points d'intérêt peuvent être considérés rétrospectivement comme importants. Par conséquent, l'évaluation repose sur quatre catégories principales : la mémorisation narrative, la compréhension spatiale, l'expérience utilisateur et l'attention portée aux détails de la scène. Ces catégories sont utilisées pour mesurer les performances, qui, dans ce contexte, sont définies par les résultats obtenus par l'utilisateur sur un ensemble de 21 variables (voir la sous-section 3.3.4 pour les détails des variables). En outre, ces catégories permettent d'analyser les types de comportements observés dans les différents groupes, par exemple en évaluant l'intérêt des utilisateurs pour les éléments secondaires de la scène. Ainsi, nos hypothèses portent à la fois sur des questions de comportement et de performance. La question centrale consiste à déterminer quelle approche de système d'aide offre le meilleur compromis entre ces quatre catégories.

Les hypothèses de cette étude se formulent comme suit :

H.1 *L'expérience utilisateur est meilleure pour le système SANS AIDE que pour les autres systèmes.* Cette hypothèse repose sur l'idée que les systèmes d'aide, en raison du temps limité disponible pour explorer l'environnement, peuvent être perçus comme une perturbation.

H.2-a *Le système COMPORTEMENT encourage des comportements favorisant une meilleure mémorisation.* Cette hypothèse repose sur l'idée que COMPORTEMENT constitue un système d'aide efficace pour améliorer la mémorisation.

H.2-b *Le système COMPORTEMENT encourage des comportements qui améliorent la compréhension spatiale.* Cette hypothèse repose sur l'idée que COMPORTEMENT constitue un système d'aide efficace pour favoriser la compréhension spatiale.

H.2-c *Le système COMPORTEMENT encourage des comportements qui renforcent l'attention aux détails.* Cette hypothèse repose sur l'idée que COMPORTEMENT constitue un système d'aide efficace pour améliorer l'attention.

H.3 *Le système TÂCHE encourage des comportements qui améliorent les performances dans l'accomplissement de tâches implicites.* Cette hypothèse repose sur l'idée que l'utilisation du système TÂCHE permet d'obtenir de meilleures performances sur les principaux points d'intérêt.

3.3.2 Protocole expérimental

L'expérience se déroule en six phases : 1) Préparation, 2) Restitution de narration immédiate, 3) Exploration de l'environnement de RV, 4) Questionnaire d'expérience virtuelle (« Immersive Virtual Experience Questionnaire » (IVEQ) en anglais), 5) Restitution différée et 6) Questionnaires sur l'attention aux détails et à l'environnement. L'ensemble des étapes se déroule dans la même pièce, où des collations sont mises à disposition des participants à tout moment. Le scénario et les questionnaires sont disponibles en anglais et en français.

1) **Préparation** Les participants reçoivent un scénario (présent en annexe A) décrivant une discussion entre un officier de police et une personne déposant une plainte pour un vol dans des bureaux. Ce vol a entraîné la disparition de huit objets appartenant au plaignant et à ses collègues. Afin d'augmenter la difficulté, les questions et remarques de l'officier de police ont été supprimées, laissant aux participants uniquement les réponses du plaignant. Ils sont invités à lire le récit autant de fois que souhaité et à assimiler au maximum les informations partielles qui y sont présentées.

2) **Restitution de narration immédiate** Lorsque les participants se sentent prêts pour l'expérimentation et qu'ils ont assimilé l'histoire, ils sont invités à la restituer de mémoire dans le cadre d'un exercice de restitution libre. Si des détails essentiels du récit sont oubliés, des questions spécifiques, telles que « *Combien de personnes travaillent dans le bureau ?* », sont posées. La restitution est alors qualifiée d'assistée. La performance de restitution est évaluée selon les critères de notation suivants :

   - **2 points** : restitution libre. Le participant se souvient spontanément sans indice.
   - **1 point** : restitution assistée. Une question est nécessaire pour inciter le participant à se souvenir.
   - **0 point** : pas de restitution. Le participant ne peut pas se souvenir, même avec une question.

   Au total, 21 points clefs étaient à retenir.

3) **Exploration** Les participants se familiarisent avec la RV dans une première salle, où ils s'entraînent à marcher en RV et à interagir avec des objets. Une fois prêts, ils disposent de 4 minutes pour explorer le bureau reconstitué en 3D dans lequel ils sont téléportés. Cette durée, basée sur des travaux antérieurs, est jugée suffisante pour permettre une bonne compréhension de la scène tout en restant assez courte pour mémoriser tous les détails (REICHHERZER et al., 2018). Les participants reçoivent pour consigne d'explorer librement, d'observer la pièce autant que possible, d'identifier les emplacements des 8 objets volés, et rien de plus. Ces instructions sont uniformes pour tous les groupes de participants. Des marqueurs interactifs de scène de crime, incluant 4 leurres destinés à introduire de l'ambiguïté, sont placés dans le bureau aux emplacements supposés des objets volés. Pour plus de détails, voir la sous-section 3.3.5 et la figure 3.1.

4) **Questionnaire d'expérience virtuelle (IVEQ)** Les participants remplissent ensuite

le questionnaire IVEQ (Tcha-Tokey, 2018) (présent en annexe A), conçu pour recueillir leurs ressentis concernant l'utilisabilité et l'expérience utilisateur. Ce questionnaire, dont la version 2 a été utilisée dans cette étude, est un outil unifié fondé sur neuf autres questionnaires existants (PQ, ITQ, Flow4D16, CSE, AEQ, SUS, UTAUT, AttracDiff, SSQ) et validé pour mesurer diverses facettes de l'expérience utilisateur (Tcha-Tokey et al., 2016).

5) **Restitution différée** L'exercice de la phase 2 est répété, avec un intervalle minimal de 30 minutes entre la restitution immédiate et la restitution différée.

6) **Questionnaires Attention et Environnement** Les dernières questions portent sur des détails de la scène afin d'évaluer l'attention. Cinq questions sont posées : « *Estimez les dimensions de la pièce en mètres carrés.* », « *Combien de chaises y avait-il dans la pièce ?* », « *Combien d'entre elles ont été renversées ?* », « *Combien de bibliothèques y avait-il dans la pièce ?* », et « *Combien de bureaux y avait-il dans la pièce ?* ». Pour la question relative aux dimensions de la pièce, nous n'avons pas utilisé de protocole plus précis de perception des distances et des tailles (tels que (Lin et al., 2024; Napieralski et al., 2011)), car notre objectif n'était pas d'évaluer la perception. Cette question considère la taille comme l'un des détails de la pièce, évaluant ainsi uniquement l'attention des participants.

   En guise de tâche finale, les participants se voient présenter un plan en 2D de la pièce et doivent localiser avec précision les huit objets volés. Un score de compréhension spatiale est calculé à partir de leurs réponses. Pour chaque réponse, nous superposons le même plan en 2D avec les emplacements corrects des objets (illustré dans la figure 3.3) afin de classer la réponse comme : **Correcte** : l'objet est placé dans un cercle vert de 15 cm de rayon autour de la position correcte ; **Approximée** : l'objet est placé hors du cercle vert mais reste dans la zone correcte ; **Erronée** : l'objet est placé dans une position incorrecte et **Omise** : l'objet n'est pas positionné du tout. Ces quatre scores sont décrits en détail dans le tableau 3.1.

3.3.3 Participants

L'étude a impliqué 66 participants (65,1% d'hommes, 33,3% de femmes et 1,51% ont préféré ne pas divulguer leur genre), âgés de 20 à 59 ans (âge moyen : 33,9). Les participants, principalement des étudiants ou des membres du personnel de l'Université de Montpellier, étaient des volontaires ayant une vue normale ou corrigée à la normale (40,9% portaient des lunettes ou des lentilles de contact). La plupart avait une expérience minimale de la RV (47,0%), et une grande partie n'avaient aucune expérience préalable (39,4%). Aucun des participants n'a signalé avoir des problèmes de mémoire immédiate ou à long terme.

Cette expérience a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université de Montpellier, avis N°UM2022-010.

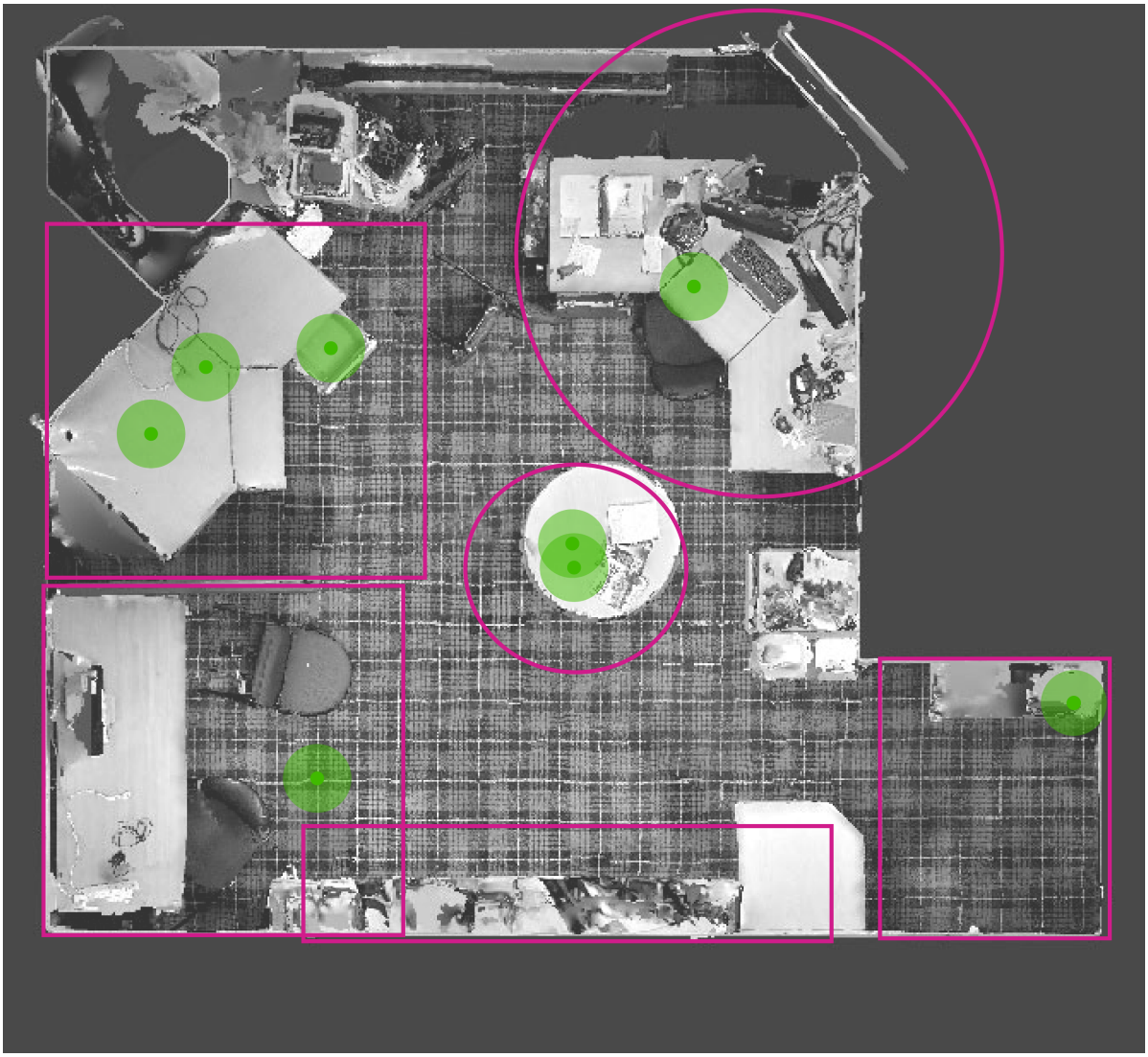


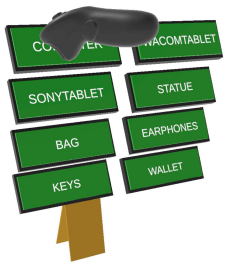
FIGURE 3.3 – *Plan 2D montrant les emplacements corrects des objets, avec des cercles verts délimitant un rayon de 15 cm autour de chaque objet. Les 6 zones utilisées pour la collecte des données lors de l'action NAVIGATION VERS sont représentées en rose.*

3.3.4 Procédure

L'étude a une conception inter-sujets (« between-subject design » en anglais). Les participants ont été répartis aléatoirement dans l'un des trois groupes : SANS AIDE, COMPORTEMENT, et TÂCHE. Le protocole était strictement identique pour chaque groupe, et aucun participant n'était informé des tâches implicites utilisées par le système TÂCHE. Chaque groupe comprenait 22 participants. Pendant l'exploration en RV (phase 3), les groupes COMPORTEMENT et TÂCHE ont bénéficié d'aides visuelles fournies par l'environnement. En revanche, SANS AIDE constituait le groupe de contrôle : les actions des participants étaient enregistrées, mais aucune aide visuelle ne leur était fournie par le système. Tout au long des deux phases de restitution (phases 2 et 5), de l'exploration (phase 3), du IVEQ (phase 4) et des questionnaires finaux (phase 6), toutes les réponses des participants ont été collectées et converties en scores. Ces scores permettent



(**a**) *Pour interagir avec un marqueur, les utilisateurs doivent d'abord entrer en contact avec celui-ci.*



(**b**) *Ils sélectionnent ensuite l'objet volé qu'ils estiment avoir été présent à cet emplacement.*



(**c**) *Le menu se ferme, et une note indiquant l'objet sélectionné s'attache au marqueur.*

Figure 3.4 – *Description d'une interaction en deux étapes avec les marqueurs de scène de crime : une note contenant la réponse de l'utilisateur apparaît (figure 3.4(c)) après que le marqueur a été touché (figure 3.4(a)) et qu'une réponse a été sélectionnée (figure 3.4(b)).*

d'évaluer 21 variables indépendantes, réparties en quatre catégories : la mémorisation narrative, la compréhension spatiale, l'expérience utilisateur et l'attention portée aux détails de la scène. Ces catégories sont directement liées aux hypothèses décrites dans la sous-section 3.3.1. Les variables et leur utilisation sont synthétisées dans le tableau 3.1.

3.3.5 Dispositif expérimental

Comme mentionné précédemment, l'environnement virtuel utilisé provient de la partie RV de Reichherzer et al. (2018). Un bureau de dimensions $6.0 \times 5.0\,\mathrm{m}^2$ a été reconstruit sous la forme d'un maillage comprenant 293 811 polygones, comme illustré en figure 3.1 et en figure 3.3. Le casque utilisé était un Pico Neo 3 Pro Eye[1], équipé d'un système de suivi oculaire intégré Tobii[2] avec une fréquence d'échantillonnage maximale de 90 Hz. Les participants pouvaient marcher librement dans une zone de $6.0 \times 6.0\,\mathrm{m}^2$, aucun autre système de déplacement n'étant implémenté. Leur seule interaction dans la pièce concernait les marqueurs de délit, comme décrit dans la figure 3.4. Cette interaction, identique pour les trois groupes, leur permettait de proposer l'emplacement des objets volés. Les aides fournies étaient passives et ne nécessitaient aucune interaction de la part des participants.

Lorsqu'ils se sentaient prêts, les participants commençaient l'expérience et étaient transportés dans le bureau reconstitué. Pendant cette phase, plusieurs données ont été enregistrées à une fréquence de 10 Hz : la position de la tête, la position des mains, la direction du regard, la cible du regard, le point d'impact du regard avec l'environnement, ainsi que l'état d'affichage des aides (actif ou non). Ces données brutes étaient analysées toutes les 2 secondes pour vérifier si une nouvelle action avait été effectuée. Pour le groupe comportement, l'historique des actions était également analysé toutes les 2 secondes afin de détecter l'intention des participants. Concernant l'aide regard, une fréquence de clignotement de 10 Hz a été retenue, basée sur la

1. Lien de référence Pico Neo 3 : https://www.picoxr.com/fr/products/neo3-pro-eye, Date de dernière consultation le : 04/12/2024
2. Lien de référence Tobii : https://www.tobii.com/products/integration/xr-headsets/device-integrations/pico-neo-3-pro-eye, Date de dernière consultation le : 04/12/2024

littérature SGD (BAILEY et al., 2009 ; ROTHE et al., 2018). La logique de l'expérience, le système d'enregistrement et le système de RV ont été implémentés dans Unity[3], version 2021.2.8f1.

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
SCORE MÉMORISATION IMMÉDIAT (*INSTANT RECALL SCORE* en anglais)	MN	Score de mémorisation obtenu lors de la phase 2, basé sur la restitution de 21 éléments à mémoriser. 2 points ont été attribués pour une restitution sans aide, 1 point pour une restitution provoqué par une question et 0 point pour l'absence de restitution. Valeur quantitative comprise entre 0 et 42.	H1 - H2
SCORE MÉMORISATION DIFFÉRÉ (*DELAYED RECALL SCORE* en anglais)	MN	Score calculé exactement comme le SCORE MÉMORISATION IMMÉDIAT, mais obtenu en phase 5 et non en phase 2.	H1 - H2
CONNAISSANCES (*KNOWLEDGE* en anglais)	CS	Nombre d'objets (max = 8) correctement positionnés dans un rayon de 15 cm autour de la position réelle (voir la figure 3.3) au cours de la phase 6.	H1 - H2
INTUITIONS (*GUESS* en anglais)	CS	Nombre d'objets (max = 8) positionnés dans la zone correcte mais en dehors d'un rayon de 15 cm autour de la position réelle (voir la figure 3.3) au cours de la phase 6.	H1 - H2
OMISSIONS	CS	Nombre d'objets (max = 8) non positionnés pendant la phase 6.	H1 - H2
INVENTIONS	CS	Nombre d'objets (max = 8) positionnés dans la mauvaise zone (voir la figure 3.3) pendant la phase 6.	H1 - H2

(*Le tableau continue à la page suivante*)

3. Lien de référence Unity : https://unity.com/, Date de dernière consultation le : 04/12/2024

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
PRÉSENCE	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives au sentiment de présence dans le IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert en 10 points.	H3
ENGAGEMENT	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives à l'engagement dans le IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert en 10 points.	H3
IMMERSION	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives au sentiment d'immersion dans le IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert en 10 points.	H3
FLOW	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives au flow dans le IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert à 10 points.	H3
ÉMOTION	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives aux émotions dans le IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert à 10 points.	H3
JUGEMENT	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives aux jugements sur l'expérience dans IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert à 10 points.	H3

(*Le tableau continue à la page suivante*)

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
CONSÉQUENCES	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives aux conséquences de l'expérience dans IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert à 10 points.	H3
ADOPTION TECHNOLOGIE	UX	Moyenne de toutes les réponses relatives à l'adoption de la technologie dans IVEQ au cours de la phase 4. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert à 10 points.	H3
DIMENSION PIÈCE (*ROOM SIZE* en anglais)	AD	Taille de la pièce selon le participant au cours de la phase 6. Valeur quantitative - la bonne réponse était $30m^2$.	H1 - H4
CHAISES (*CHAIRS* en anglais)	AD	Nombre de chaises selon le participant au cours de la phase 6. Valeur quantitative - la bonne réponse était 4.	H1 - H4
CHAISES RENVERSÉES (*KNOCKED CHAIRS* en anglais)	AD	Nombre de chaises renversées selon les participants au cours de la phase 6. Valeur quantitative - la bonne réponse était 2.	H1 - H4
BIBLIOTHÈQUES (*BOOKCASES* en anglais)	AD	Nombre de bibliothèques selon le participant lors de la phase 6. Valeur quantitative - la bonne réponse était 2.	H1 - H4
BUREAUX (*DESKS* en anglais)	AD	Nombre de bureaux selon le participant durant la phase 6. Valeur quantitative - la bonne réponse était 3.	H1 - H4
DISTANCE PARCOURUE	AD - CS	Distance parcourue (en m) au cours de la phase 3.	H1 - H2 - H4

(*Le tableau continue à la page suivante*)

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
SURFACE VISUELLE	AD - CS	Surface (en m^2) explorée visuellement au cours de la phase 3.	H1 - H2 - H4

TABLE 3.1 – *Résumé de toutes les variables générées au cours de notre expérimentation ainsi que des hypothèses associées. MN = Mémorisation Narrative, CS = Compréhension Spatiale, UX = eXpérience Utilisateur, AD = Attention aux Détails.*

3.4 Résultats

Cette section présente les résultats issus de l'analyse des données et de l'exploration des tendances. Les quatre catégories principales sont examinées successivement, suivies d'une discussion approfondie sur les comportements observés dans chaque groupe.

3.4.1 Méthodologie d'analyse

Pour l'analyse statistique, Matlab R2021b a été utilisé couplé avec la Statistics and Machine Learning Toolbox™ Version 12.2. La normalité a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les différences entre les groupes ont été évaluées dans un dispositif à trois niveaux (en utilisant les trois groupes : TÂCHE, COMPORTEMENT, SANS AIDE) ainsi que dans un dispositif à deux niveaux, avec deux groupes comparés dans chaque cas. Lorsque les hypothèses d'application de l'analyse de la variance (ANOVA) à sens unique étaient remplies, le test ANOVA a été utilisé. Dans le cas contraire, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé. Pour le dispositif à trois niveaux, les valeurs p significatives ont été ajustées avec la correction de Bonferonni. Le coefficient de corrélation de Pearson a été calculé pour déterminer les corrélations linéaires entre les variables. La signification statistique a été fixée à $0,05$ pour tous les tests.

3.4.2 Similarités

Plusieurs variables ont des similarités entre les groupes. Nous présentons ces résultats intéressants ci-dessous et nous les discutons dans la section 3.5.

Mémorisation Narrative
Les différences ont été évaluées à l'aide d'une ANOVA à mesures mixtes 2×3. Le facteur indépendant était le groupe (TÂCHE, COMPORTEMENT, et SANS AIDE), et les mesures répétées ont été prises à deux moments (SCORE MÉMORISATION IMMÉDIAT et SCORE MÉMORISATION DIFFÉRÉ). Aucune différence significative de performance globale entre les groupes n'a été observée ($F = 0{,}934, p = 0{,}398$). La figure 3.5 illustre les distributions des résultats : COMPORTEMENT (en rose foncé) semble avoir des résultats plus uniformes en matière de mémorisation narrative, montrant moins de variation dans les scores finaux, avec des quartiles plus proches que TÂCHE et SANS AIDE. Tous les groupes ont toutefois montré une amélioration significative de la compréhension après l'exposition

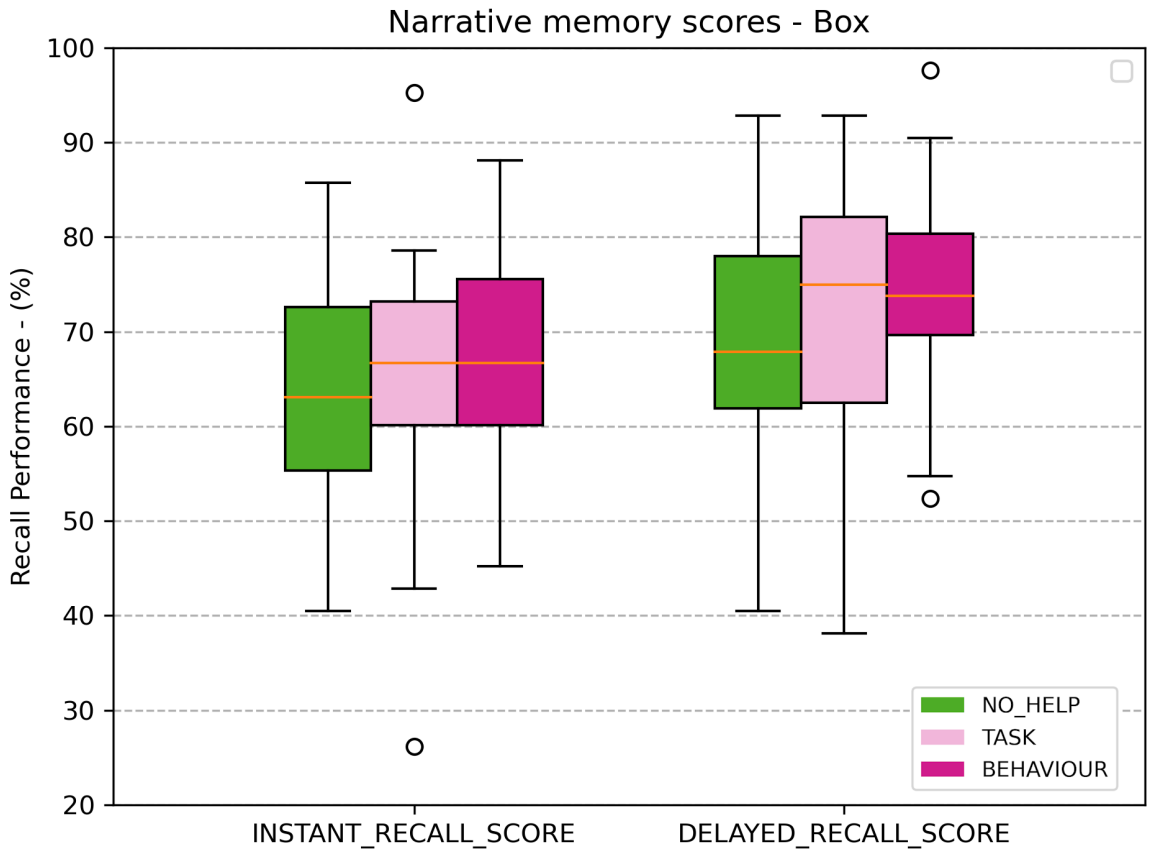


FIGURE 3.5 – *Résultats pour la catégorie **Mémorisation Narrative**. Diagrammes en boîte illustrant chaque variable. Pour chaque variable, les traductions de noms sont présenté dans le tableau 3.1. Les couleurs utilisées sont les suivantes : le rose foncé pour le groupe COMPORTEMENT, le rose clair pour le groupe TÂCHE, et le vert pour le groupe SANS AIDE.*

à la scène en RV ($F = 2\,390, p < 0.001$), en accord avec les conclusions de REICHHERZER et al. (2018).

Compréhension Spatiale

Aucune différence significative n'a été observée pour les variables CONNAISSANCES et INTUITIONS, indiquant une absence de variation dans les performances globales de compréhension de l'espace entre les groupes. Par ailleurs, une corrélation linéaire a été mise en évidence entre SCORE MÉMORISATION DIFFÉRÉ et CONNAISSANCES ($r = 0{,}406, p = 0{,}000\,645$), confirmant ainsi les résultats obtenus pour la mémorisation narrative en termes de performance globale.

eXpérience Utilisateur

Aucune différence significative n'a été observée pour les variables IVEQ liées à l'Engagement, l'Immersion, le Flow, le Jugement envers l'expérience et les Conséquences de l'expérience.

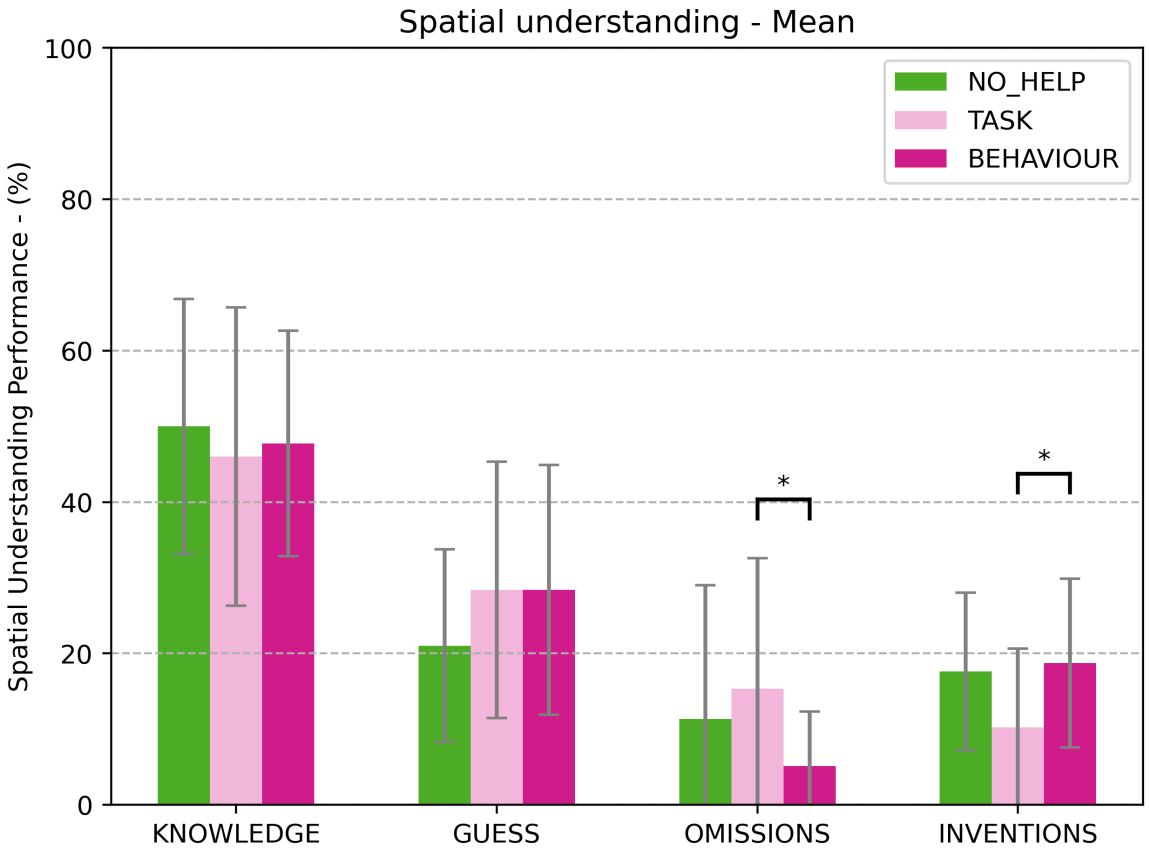


FIGURE 3.6 – *Résultats pour la catégorie **Compréhension Spatiale**. Diagrammes en barres représentant les moyennes et les écarts-types pour chaque variable. Les astérisques indiquent les différences significatives entre les groupes (voir la sous-section 3.4.3).*

Attention aux Détails

Chaque variable de cette catégorie possède une réponse correcte décrite dans le tableau 3.1. Les réponses des participants ont été représentées dans la figure 3.8 en calculant la distance normalisée par rapport à cette réponse correcte, plutôt qu'en utilisant les valeurs brutes. Cette méthode facilite la lecture, garantit une échelle uniforme et permet une visualisation rapide des surestimations ou des sous-estimations. La distance a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Distance_{RéponseCorrect} = \frac{Réponse_{utilisateur} - Réponse_{Correct}}{Réponse_{Correct}}$$

Aucune différence significative n'a été observée pour les variables DIMENSION PIÈCE, BUREAUX, et CHAISES RENVERSÉES.

Mouvements des yeux et du corps

La distance parcourue par les utilisateurs (en m) est linéairement corrélée à leur exploration visuelle de la scène (en m^2) ($r = 0{,}409, p < 0.001$). Ces variables n'ont montré aucune autre corrélation significative, et aucune différence significative entre les groupes n'a été constatée, à l'exception d'une dispersion légèrement plus étendue

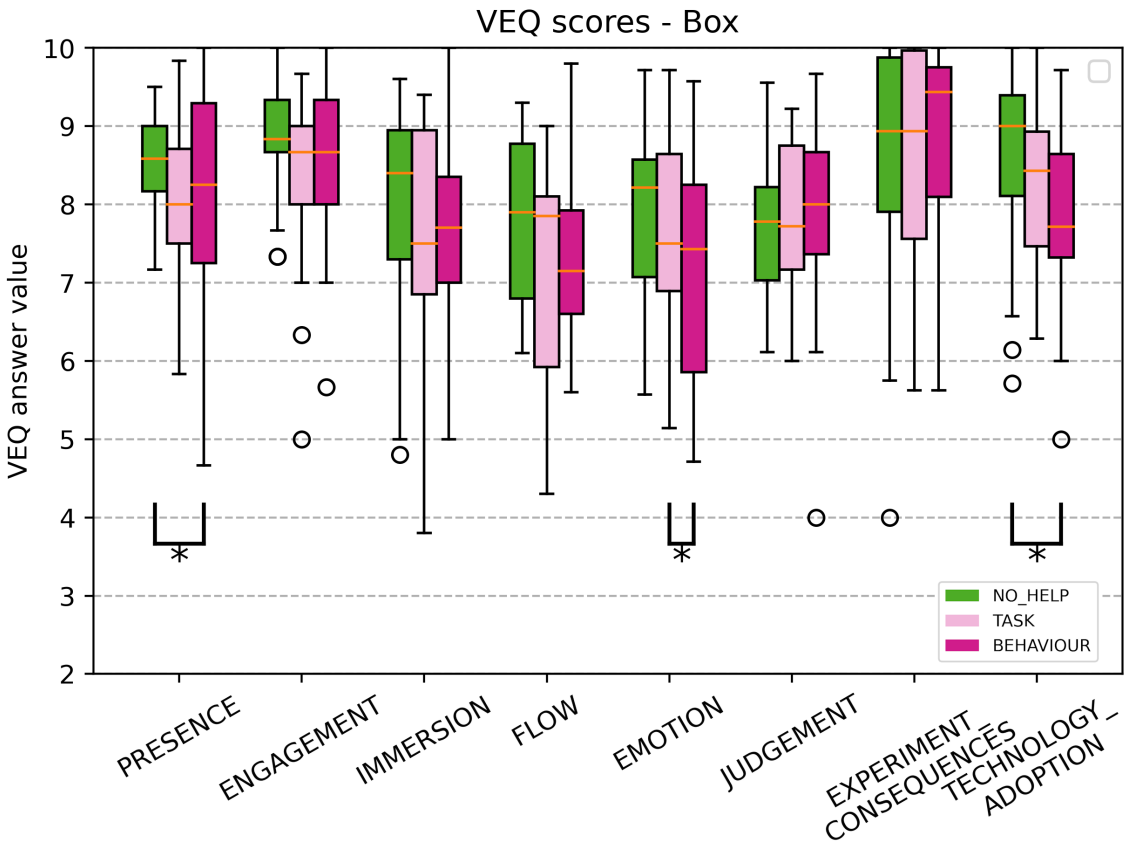


FIGURE 3.7 – *Résultats pour la catégorie* ***Expérience Utilisateur****.*

des déplacements pour le groupe COMPORTEMENT. Nous pouvons en conclure que l'exploration physique et visuelle de la pièce est similaire entre les groupes.

3.4.3 Différences

Dans cette section, nous présentons les variables qui présentent des différences statistiquement significatives entre les groupes.

Compréhension Spatiale
Deux différences significatives ont été identifiées entre les groupes COMPORTEMENT et TÂCHE : pour OMISSIONS dans le dispositif à deux niveaux ($p = 0{,}035\,1$), pour INVENTIONS dans le dispositif à trois niveaux ($p = 0{,}034\,7$). Le groupe COMPORTEMENT présente le plus grand nombre d'inventions et le moins d'omissions dans ses réponses, tandis que le groupe TÂCHE adopte le comportement inverse (voir la figure 3.6).

eXpérience Utilisateur
Le groupe SANS AIDE s'est distingué significativement du groupe COMPORTEMENT pour les variables Émotion et Adoption à la Technologie ($p = 0{,}045\,8$ et $p = 0{,}024\,8$, respectivement, dans le dispositif à deux niveaux). Il diffère également du groupe TÂCHE pour la Présence ($p = 0{,}023\,7$, également dans le dispositif à deux niveaux). Dans chaque

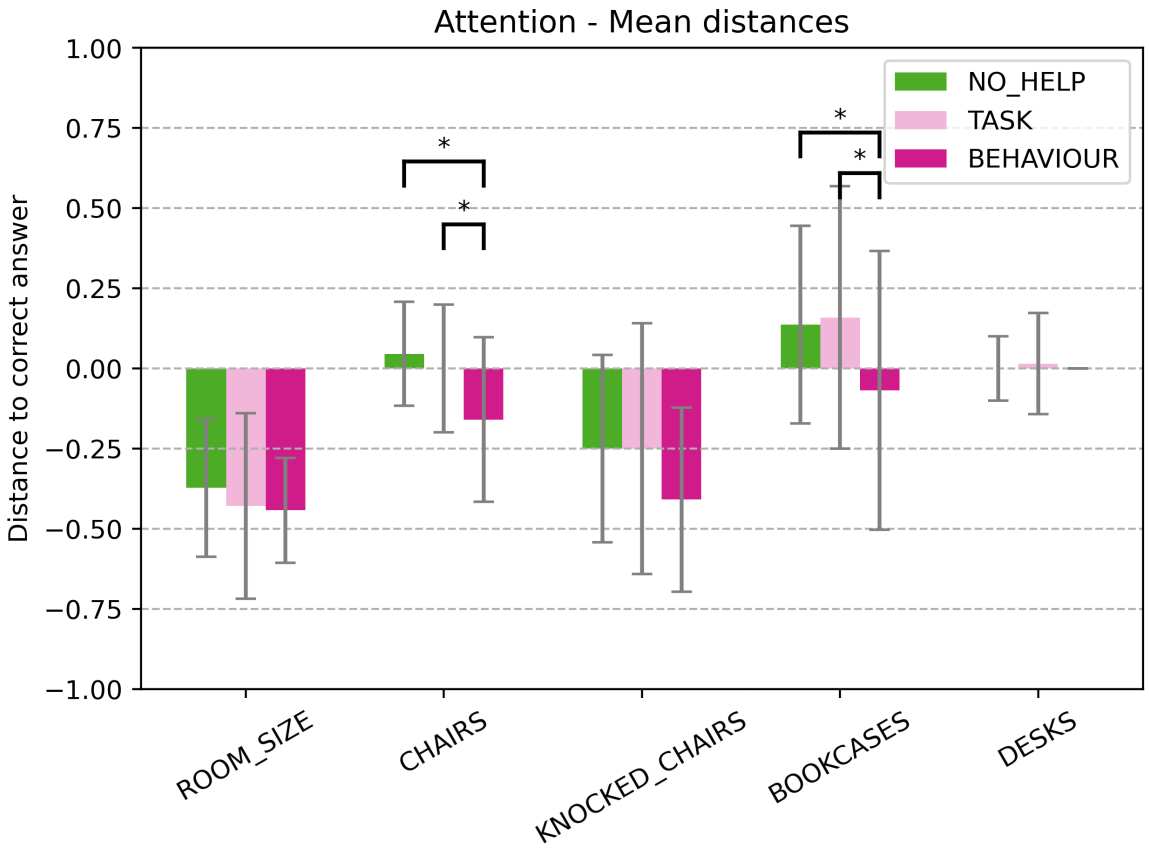


Figure 3.8 – *Résultats pour la catégorie **Attention aux Détails**.*

cas, le groupe sans aide a obtenu de meilleurs résultats, suggérant que les aides ont pu perturber l'expérience des utilisateurs dans les deux groupes aidés (comportement et tâche). Voir la figure 3.7 pour plus de détails.

Attention aux Détails
Le groupe comportement s'est distingué significativement des groupes tâche et sans aide pour les estimations de chaises et bibliothèques. Par rapport au groupe tâche, les différences étaient significatives pour chaises ($p = 0{,}045\,8$) et bibliothèques ($p = 0{,}024\,0$) dans le modèle à deux niveaux. Par rapport au groupe sans aide, les différences étaient significatives pour chaises ($p = 0{,}012\,7$) dans le modèle à trois niveaux, et pour bibliothèques ($p = 0{,}016\,5$) dans le modèle à deux niveaux. Le groupe comportement a obtenu les performances les plus faibles dans l'estimation des chaises, mais les meilleures dans l'estimation des bibliothèques. Voir la figure 3.8 pour plus de détails.

3.4.4 Analyse du comportement

Ces différences et similitudes entre les groupes, pour l'ensemble des variables (voir le tableau 3.1 pour la liste complète), permettent d'identifier et de mettre en évidence certaines stratégies spécifiques adoptées par les groupes aidés. En revanche,

les résultats ne permettent pas de conclure sur l'existence d'une stratégie particulière chez les participants du groupe SANS AIDE.

Stratégie d'exploration
L'une des principales différences de comportement entre les participants du groupe COMPORTEMENT et ceux des autres groupes réside dans leur compréhension de l'emplacement des bibliothèques (BIBLIOTHÈQUES) et des chaises (CHAISES). Le groupe COMPORTEMENT a obtenu un score significativement meilleur pour la variable BIBLIOTHÈQUES, mais un score significativement inférieur pour CHAISES. Cette différence peut s'expliquer par le positionnement des chaises lors de l'expérience. Comme le montre la figure 3.3, toutes les chaises étaient situées à proximité d'un ou de plusieurs marqueurs de délit corrects. Cependant, le système COMPORTEMENT, ne disposant pas de connaissances sur les bons marqueurs de délit, a dirigé les participants vers tous les marqueurs de la pièce, y compris ceux utilisés comme leurres. En conséquence, les utilisateurs du groupe COMPORTEMENT ont été davantage distraits des bons emplacements par les aides fournies, ce qui les a également éloignés des détails environnants, comme les chaises. À l'inverse, ils ont pu concentrer leur attention sur des points d'intérêt secondaires, tels que l'emplacement des bibliothèques. Ces résultats suggèrent une stratégie d'exploration basée sur des points d'intérêt secondaires, observée uniquement chez les participants du groupe COMPORTEMENT.

Stratégies de compte-rendu
Deux stratégies opposées émergent pour les réponses données dans la catégorie de la compréhension de l'espace : les participants du groupe TÂCHE ont privilégié une réduction des INVENTIONS en augmentant les OMISSIONS, ne signalant que ce dont ils étaient sûrs ; à l'inverse, les participants du groupe COMPORTEMENT ont réduit les OMISSIONS en augmentant les INVENTIONS, signalant tous les points d'intérêt, même si cela impliquait des erreurs. Ces « erreurs » observées chez les participants du groupe COMPORTEMENT peuvent également être interprétées différemment en tenant compte de leur stratégie d'exploration spécifique : les nouveaux lieux qu'ils ont mis en évidence, bien qu'étant considérés comme des erreurs par rapport au scénario, pourraient représenter des points d'intérêt qui auraient autrement été ignorés.

Deux stratégies claires et distinctes apparaissent ainsi : une stratégie basée sur la prudence, consistant à ne signaler que les points d'intérêt confirmés (groupe TÂCHE) ; une stratégie plus exploratoire, consistant à signaler tous les points d'intérêt, même au risque d'inclure des erreurs (groupe COMPORTEMENT).

3.5 Discussion

Dans cette section, nous présentons nos conclusions concernant notre système de RV adaptative task-blind. En résumé, notre étude :

1. fournit aux utilisateurs des informations partielles et des missions générales (« explorer librement », « connaître la pièce » et « déterminer la position des objets volés »),

2. est conçue pour évaluer les performances liées à ces tâches implicites,
3. analyse le comportement de l'utilisateur pendant le processus de réflexion.

Pour tirer des conclusions sur notre facteur indépendant (les systèmes d'aide SANS AIDE, TÂCHE et COMPORTEMENT), nous distinguons dans cette discussion deux aspects : la performance et le comportement.

3.5.1 Vérification des hypothèses

Dans cette section, les résultats présentés dans la section 3.4 sont synthétisés afin de tirer des conclusions sur les hypothèses définies dans la sous-section 3.3.1.

H.1 *L'expérience utilisateur est meilleure pour le système SANS AIDE que pour les autres systèmes.*
La performance globale du groupe SANS AIDE dans la catégorie expérience utilisateur, comparée à celle des autres groupes, valide **H.1**. Ce résultat, attendu, peut s'expliquer par le fait que les aides peuvent interrompre l'immersion. Par exemple, certains utilisateurs ont rapporté ne pas avoir compris clairement l'objectif de certaines aides, en raison de la limite de temps imposée, ce qui a réduit leur immersion dans l'environnement. Cependant, les résultats obtenus dans cette catégorie ne permettent pas de conclure quant au meilleur système d'aide entre TÂCHE et COMPORTEMENT (voir la figure 3.7 et la sous-section 3.4.3).

H.2-a *Le système COMPORTEMENT encourage des comportements favorisant une meilleure mémorisation.*
En conclusion, **H.2-a** n'est pas validée, car aucune différence significative n'a été observée entre les groupes concernant la performance de mémorisation narrative après l'exposition à la RV. Cependant, en examinant les distributions et les tendances en figure 3.5, le système COMPORTEMENT présente une variabilité moindre dans les scores finaux, avec des quartiles plus resserrés pour les mesures post-expérimentales. Bien que ce résultat ne permette pas de valider l'hypothèse, il reste néanmoins prometteur.

H.2-b *Le système COMPORTEMENT encourage des comportements qui améliorent la compréhension spatiale.*
Le groupe COMPORTEMENT adopte, dans la catégorie de la compréhension spatiale, des stratégies d'exploration et de compte-rendu spécifiques (voir la sous-section 3.4.4) par rapport aux autres groupes. Bien que ces comportements ne conduisent pas à une amélioration claire des performances, la stratégie d'exploration adoptée par le groupe permet une appréhension différente des éléments de la scène, tandis que la stratégie de compte-rendu reflète cette compréhension. Comparé aux comportements observés dans les groupes SANS AIDE et TÂCHE, ce résultat valide **H.2-b**.

H.2-c *Le système COMPORTEMENT encourage des comportements qui renforcent l'attention aux détails.*
Le groupe COMPORTEMENT adopte une stratégie d'exploration spécifique (voir la sous-section 3.4.4) qui lui permet de surpasser les autres groupes dans la

catégorie de l'attention aux détails, validant ainsi **H.2-c**.

H.3 *Le système TÂCHE encourage des comportements qui améliorent les performances dans l'accomplissement de tâches implicites.*
Globalement, **H.3** n'est pas validée, car aucun des deux groupes aidés ne peut être désigné comme supérieur à l'autre en termes de performance, même en tenant compte des distributions et des tendances (figure 3.5 et figure 3.6). Bien que les comportements des deux groupes soient clairement différents, ces différences ne se traduisent pas par des variations significatives de performance. Nous détaillons ces similitudes de performance entre les groupes dans la section 3.6. Cependant, le fait que **H.3** ne soit pas validée souligne un potentiel prometteur pour les systèmes d'aide task-blind. En effet, ces systèmes modifient donc efficacement le comportement des utilisateurs sans entraîner de réduction des performances (voir la sous-section 3.5.2 pour plus de détails).

3.5.2 Points de suivi

Nos résultats offrent un premier aperçu des capacités des systèmes d'aide task-blind, ainsi que des approches possibles pour leur conception et leur évaluation. Bien que les aides réduisent l'immersion (**H.1**), nos systèmes d'aide, TÂCHE et COMPORTEMENT, ont modifié de manière significative le comportement des utilisateurs, en influençant les stratégies d'exploration, de comptes-rendus et la compréhension de la scène (sous-section 3.4.4, **H.2-b** et **H.2-c**). Par ailleurs, chaque approche d'aide a été évaluée comme aussi performante que les autres (**H.2-a** et **H.3**), ce qui montre que notre approche task-blind n'a pas réduit les performances par rapport à l'approche traditionnelle. Dans l'ensemble, ces résultats sont très prometteurs et montrent que la RV adaptative task-blind est non seulement faisable, mais également applicable.

Cela ouvre clairement de nouvelles perspectives dans la conception des systèmes d'aide, en remettant en question l'importance de la connaissance des tâches, en particulier dans des contextes où leur définition est complexe ou limite le comportement des utilisateurs. Parmi les cas d'utilisation potentiels, on peut citer les environnements « bac à sable », les environnements favorisant la créativité, l'expertise ou le point de vue subjectif de l'utilisateur, ainsi que toute conception visant à offrir une liberté totale aux utilisateurs.

Cette étude soulève également des questions importantes sur la performance en tant que mesure et sur son évaluation. Dans notre cas, la performance n'est pas clairement affectée par nos systèmes d'aide (résultats similaires dans les catégories Mémorisation Narrative et Compréhension Spatiale), bien qu'ils influencent de manière significative le comportement (eXpérience Utilisateur et Attention aux Détails). Cette distinction entre comportement et performance est cruciale pour la conception des systèmes de RV adaptatifs car il est essentiel de pouvoir définir comment et pourquoi aider un utilisateur. Par exemple, dans certaines applications, le comportement peut être prioritaire par rapport à la performance, notamment dans des contextes sociaux, narratifs ou éducatifs. À l'inverse, certaines applications privilégieront la performance. De plus, il existe des contextes où, à performance égale, les concepteurs préféreront promouvoir un comportement spécifique. En offrant la possibilité d'influencer le comportement sans

altérer la performance (résultats similaires à (Reichherzer et al., 2018), par exemple), cette approche task-blind ouvre un champ de recherche prometteur, permettant des compromis innovants dans la conception de systèmes de RV adaptative. Les concepteurs et développeurs peuvent ainsi choisir d'aider les utilisateurs à explorer ce que le système connaît déjà ou à explorer la scène différemment. Selon la stratégie d'exploration souhaitée, chaque approche peut se révéler efficace, en mettant l'accent sur différents aspects de la scène, sans affecter négativement les performances.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude explorant une nouvelle approche pour concevoir des systèmes d'aide en RV, en utilisant un système de RV adaptative task-blind. Cette approche se distingue de l'approche habituelle task-aware, en éliminant la nécessité d'une connaissance explicite des objectifs des utilisateurs. L'objectif principal de ces travaux était d'examiner l'impact qu'un système d'aide task-blind peut avoir sur le comportement et les performance des utilisateurs.

L'étude, menée auprès de 66 participants, a révélé que les approches tâche et comportement induisent des comportements significativement différents : tâche favorise les points d'intérêt principaux, tandis que comportement met en avant les points d'intérêt secondaires. Cette distinction met en évidence un compromis entre la performance planifiée et le comportement planifié, tout en offrant une flexibilité accrue dans la conception des systèmes d'aide. Nous avons démontré qu'il est possible de concevoir un système task-blind capable de modifier les comportements sans impact négatif sur les performances globales.

Nous aborderons en détails dans la section 5.2 les perspectives que ces premiers résultats suggèrent. Cependant, une des limites importantes de cette étude est l'absence d'amélioration claire des performances. Bien que le système comportement induit un comportement plus axé sur les détails de la scène, aucun groupe n'a montré de supériorité significative en termes de performance. Cela soulève une question essentielle : *comment un système de RV adaptative task-blind peut-il aller au-delà de la modification des comportements pour améliorer effectivement les performances ?* Lié à cette limitation, il est légitime de se demander dans cette étude, *les aides ont-elles été utiles ?* Une lacune de notre protocole réside dans l'absence de retour des utilisateurs sur l'utilité perçue des aides.

Ces interrogations sont fondamentales pour la conception des systèmes d'aide, car elles impliquent de mieux comprendre l'impact des aides sur la performance des utilisateurs. Ces limites ont pu être prises en compte et ont été d'une grande aide lors la conception de notre deuxième étude ; étude qui fera attention à inclure dans son protocole un moyen d'avoir un retour sur perception que les utilisateurs ont eu des aides. Le chapitre suivant se concentre précisément sur la problématique de la performance, en explorant les conditions et les mécanismes qui pourraient permettre à un système de RV adaptative task-blind, tout en influençant les comportements, d'améliorer significativement les performances.

CHAPITRE 4

« ASSISTED IMMERSIVE ANALYTICS » : IMPACT SUR LA PERFORMANCE D'UN SYSTÈME D'AIDE TASK-BLIND LORS DE L'EXPLORATION DE DONNÉES MULTIDIMENSIONNELLES

Sommaire

4.1 Introduction 72
4.2 Conception du système 73
4.2.1 Le système d'Immersive analytics 74
4.2.2 Récupération des données 77
4.2.3 Description des aides 78
4.2.4 Description des systèmes d'aide 79
4.3 Conception de l'expérience 82
4.3.1 Hypothèses 83
4.3.2 Protocole expérimental 84
4.3.3 Participants 87
4.3.4 Procédure 87
4.3.5 Dispositif expérimental 88
4.4 Résultats 91
4.4.1 Méthodologie d'analyse 91
4.4.2 Résultats 92
4.5 Discussion 99
4.5.1 Vérification des hypothèses 99
4.5.2 Points de suivi 101
4.5.3 Limitations 101
4.6 Conclusion 102

4.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre 3 qu'une approche task-blind, directement inspirée des conseils de conception liés à notre modèle (voir la sous-section 2.7.1), permet de créer des systèmes d'aide ayant un impact sur le comportement des utilisateurs. Dans cette première expérience, notre système adaptatif a visé à influencer l'attention et la mémorisation. Nous avons pu montrer une influence sur le comportement sans impact négatif sur les performances. Le chapitre précédent a donc permis de répondre par l'affirmative à la question « *un système de RV adaptative peut-il être conçu pour offrir une assistance en analysant le comportement humain et sans aucune connaissance des objectifs de l'utilisateur ?* », et soulève par conséquent une nouvelle question : « *comment un système de RV adaptative task-blind peut-il aller au-delà de la modification des comportements pour améliorer effectivement les performances ?* ».

C'est à cette dernière question que nous allons répondre dans ce chapitre. Pour cela, nous avons développé un système d'aide task-blind qui, encore une fois, intègre l'activité cognitive de l'utilisateur, mais qui se concentre aussi sur d'autres processus cognitifs non utilisés dans le chapitre 3. L'objectif principal est d'aider les utilisateurs à prendre conscience de leurs propres processus cognitifs afin d'améliorer leur métacognition (voir la section 2.3 pour plus de détails sur ce processus cognitif). Nous mettons l'accent sur la métacognition pour deux raisons. (1) Le suivi métacognitif et le contrôle métacognitif (NELSON, 1990) sont deux composants de la métacognition qui permettent aux utilisateurs de réfléchir à leurs actions et à leurs processus cognitifs. Avoir une influence sur le suivi d'un utilisateur induit une variation dans son contrôle, ce qui conduit à des ajustements comportementaux. (2) La métacognition est une fonction cognitive essentielle, étroitement liée à des mécanismes complexes comme l'apprentissage et l'émission de jugements efficaces (POHL, 2022). Lors d'une tâche liée à la réflexion et l'exploration, ces mécanismes étant essentiels, la métacognition joue donc un rôle important. Par exemple, le fait de fournir des indices visuels en temps réel sur les statistiques d'interaction d'un utilisateur avec l'environnement pourrait directement influencer son processus de réflexion, et donc son comportement vis-à-vis de cet environnement.

Notre approche task-blind vise ici à améliorer la métacognition de l'utilisateur grâce à des feedback visuels donnant des informations à ce dernier sur ses propres actions. Le but final de notre système est d'aider les utilisateurs à accomplir leur tâche, quelle qu'elle soit.

Pour répondre à notre question de comment un tel système peut améliorer effectivement les performances, nous avons développé trois variantes d'un système d'aide task-blind. Nous avons évalué leur efficacité par le biais d'une étude utilisateur inter-sujets et nous les avons comparé à un groupe contrôle sans assistance. L'étude s'est concentrée sur une tâche d'Immersive Analytics (voir la section 2.4) consistant à réaliser un clustering manuellement. 56 personnes y ont participé. Elle nous a permis d'évaluer nos systèmes d'aide dans un environnement reflétant un cas d'usage réel. Les performances des utilisateurs dans chaque variation ont été évaluées par rapport à un clustering de référence, déterminé à l'aide d'un algorithme et décrit dans la section 4.2. Nous avons également étudié comment la conception des sys-

tèmes d'aide influençait l'utilisateur, afin de comprendre comment et pourquoi ces systèmes pouvaient améliorer les performances. Ces résultats réaffirment l'efficacité de l'approche task-blind relativement peu explorée dans la littérature en RV adaptative.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : la section 4.2 détaille la conception du système, y compris la mise en œuvre de l'environnement de clustering, les trois variantes du système d'aide task-blind et les méthodes de collecte de données employées. La section 4.3 décrit la conception de l'expérience, couvrant nos hypothèses, le protocole expérimental, les informations sur les participants et les détails de l'installation. La section 4.4 présente les résultats de notre étude, comprenant l'analyse des performances et des données comportementales recueillies. La section 4.5 discute nos résultats, vérifie nos hypothèses, aborde les limites et examine les implications potentielles de notre travail. Enfin, la section 4.6 conclut le chapitre en résumant nos contributions, en ouvrant des perspectives et les orientations retenues pour de futurs travaux.

4.2 Conception du système

Notre expérience consiste pour l'utilisateur à réaliser une tâche de clustering en RV. Nous avons utilisé un jeu de données fourni par les auteurs de (Hu et al., 2022), dont nous avons sélectionné un sous-ensemble pour s'assurer que la tâche reste accessible à des utilisateurs non experts. La tâche consiste à classer 12 sujets, chacun décrit par 9 variables, en 3 groupes distincts, appelés « clusters » dans le reste du document . Par ailleurs, nous avons établi un clustering de ce jeu de données en utilisant un algorithme de k-means. Ce clustering sert de référence, de vérité terrain, que nous allons comparer aux clusters formés par les utilisateurs pour évaluer leurs performances. Nous avons illustré notre clustering en réalisant une analyse en composantes principales (ACP) du jeu de données. La figure 4.1(a) montre la proportion de variance de l'ACP. Nous avons choisi de représenter 80% de variance, ce qui nous donne une représentation à trois dimensions. La courbe rouge représente le cumul d'explicabilité de la variance jusqu'à la troisième dimension. La figure 4.1(b) montre la représentation de notre clustering de référence sur ces trois dimensions. Les douze sujets sont représentés et les trois clusters se ont respectivement de deux, quatre et six sujets. Les couleurs des individus représentent les clusters.

Dans cette expérience, nous cherchons à évaluer si un système d'aide task-blind peut améliorer ou non les performances, et le cas échéant, comment et pourquoi. Pour ce faire, les participants ont été assignés aléatoirement à l'un des quatre groupes : un groupe sans assistance et trois groupes bénéficiant chacun d'un système d'aide différent que nous avons conçu. Pendant l'expérience en RV, nous avons suivi et enregistré le mouvement de la tête, des mains et des yeux de l'utilisateur. De même que pour la première expérience, cette configuration de capteurs simple et non invasive a été privilégiée afin d'éviter des facteurs non contrôlés et des problèmes d'utilisation, tels que les erreurs liées à l'exploitation de l'activité électrodermale, comme discuté par Babaei et al. (2021).

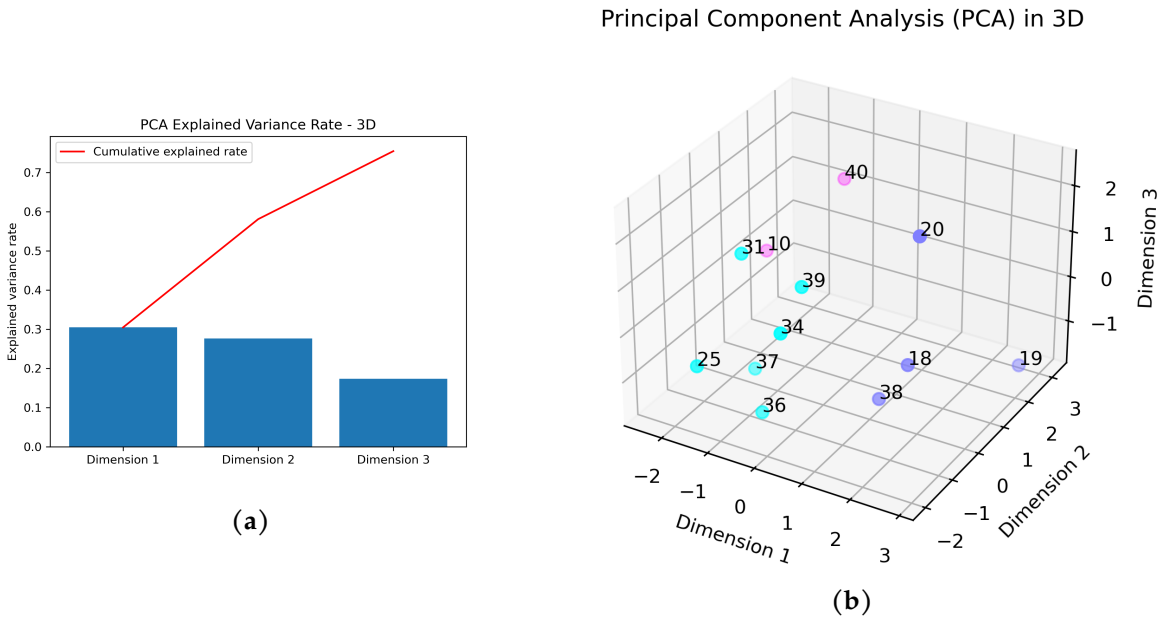


FIGURE 4.1 – *Représentation de l'ACP (« PCA » en anglais) de notre clustering de référence. Les trois clusters se composent respectivement de deux (en rose), quatre (en violet) et six (en cyan) sujets. La profondeur d'un point dans l'espace 3D est encodée sur l'opacité du point.*

Cette section décrit en détail les trois couches constituant notre système. En sous-section 4.2.1, nous présentons notre système d'Immersive Analytics, qui permet aux utilisateurs d'interagir avec l'ensemble des données et de les manipuler. En sous-section 4.2.2, nous présentons notre système de récupération des données, qui collecte, en temps réel, toutes les données dont nous avons besoin pour les systèmes d'aide et pour l'évaluation de l'expérience. Notre dernière couche, les systèmes d'aide en eux-même, sont détaillés en deux sous-sections. En sous-section 4.2.3, nous détaillons les types d'assistances qu'ils offrent. En sous-section 4.2.4, nous détaillons la manière dont ils interprètent et exploitent les données collectées auprès des utilisateurs.

4.2.1 Le système d'Immersive analytics

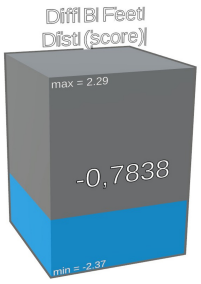
Notre environnement est conçu pour fournir aux utilisateurs des outils pour effectuer un clustering. Tous les sujets et leurs variables associées peuvent être visualisés à l'aide de deux types d'objets interactifs : un objet représentant un sujet (voir la figure 4.2(a)), caractérisé par 9 variables et pour lequel l'utilisateur peut visualiser, analyser et interagir avec ses variables ; un objet bleu et gris représentant une variable (voir la figure 4.2(b)), qui affiche ses informations clefs, telles que le nom de la variable et la valeur sur cette variable pour le sujet correspondant (en valeur numérique et via le remplissage de sa couleur bleu). Cet objet affiche également les valeurs minimales et maximales calculées pour cette variable sur l'ensemble des sujets.

L'environnement virtuel de travail est divisée en trois zones, chacune remplissant une fonction différente :

- Tableau des sujets : il affiche les 12 sujets à classer, comme indiqué dans la figure 4.3(a). Les sujets peuvent être analysés dans n'importe quel ordre. Les sujets



(**a**) *Représentation d'un sujet dans l'environnement. Cet objet contient les informations sur un seul sujet. Il y a douze sujets dans notre expérience.*



(**b**) *Représentation d'une variable associée à un sujet. La valeur de la variable est représentée à la fois par une valeur numérique et par le remplissage bleu.*

Figure 4.2 – *Dans notre expérience, les participants utilisent des objets pour analyser le jeu de données. La figure 4.2(a) illustre l'un des douze sujets, chacun caractérisé par leurs valeurs sur neuf variables, tandis que la figure 4.2(b) montre une variable spécifique associée à un sujet.*

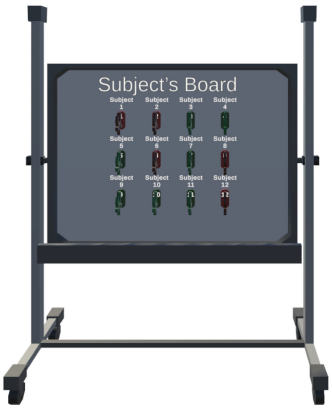
qui ont déjà été placés dans un cluster sont colorés en rouge.

- Table de travail : les utilisateurs peuvent placer un sujet sur le piédestal pour générer les neuf variables associées à ce sujet sur les neuf cibles circulaires orange, comme le montre la figure 4.3(b). Cette configuration permet une visualisation complète des données du sujet à travers toutes les variables. Lorsque le sujet est retiré du piédestal, les objets variables correspondants sont automatiquement détruits. En effet, un seul sujet est analysé à la fois.

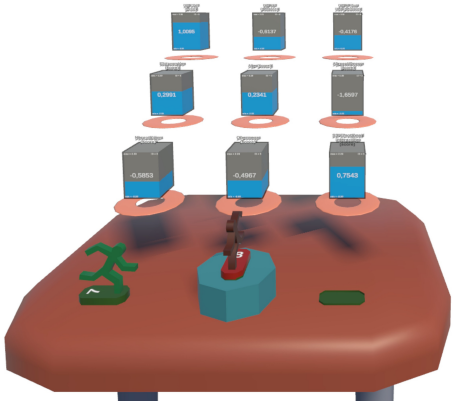
- Zone de classification : les utilisateurs peuvent placer un sujet sur l'un des trois panneaux disponibles, comme illustré en figure 4.3(c). Chaque panneau représente un cluster distinct. Les sujets peuvent être librement déplacés d'un cluster à l'autre ou être entièrement retirés. À la fin de l'expérience, tous les sujets d'un même panneau sont considérés comme faisant partie du même cluster. Les cubes gris remplis de bleu en haut de chaque panneau (représentant les variables) se mettent à jour en temps réel pour refléter les valeurs du centroïde du cluster, offrant aux utilisateurs une visualisation immédiate et intuitive du cluster qu'ils sont en train de construire.

Le processus général d'analyse se résume ainsi : les utilisateurs commencent par saisir un sujet sur le tableau des sujets (figure 4.3(a)), puis le placent sur la table de travail pour visualiser ses valeurs pour toutes les variables (figure 4.3(b)). Une fois que les utilisateurs ont examiné et mémorisé les caractéristiques du sujet, ils le placent sur le panneau de classification le plus approprié en fonction des valeurs du sujet et du comportement moyen des groupes (figure 4.3(c)). Ils répètent ainsi de suite le processus avec les autres sujets.

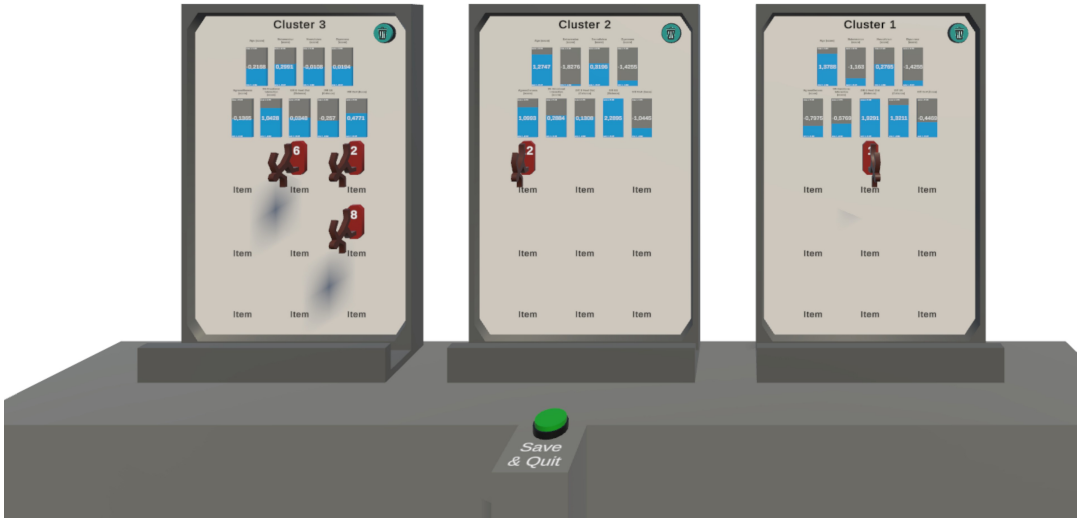
En termes d'interaction, les utilisateurs peuvent effectuer l'ensemble de l'analyse en saisissant simplement des objets et en les relâchant à différents endroits. Les sujets et les



(**a**) *Le tableau des sujets contient les 12 sujets. Les participants démarrent l'expérience devant ce tableau.*



(**b**) *La table de travail génère automatiquement une représentation visuelle de chaque variable pour le sujet placé sur le piédestal.*



(**c**) *La zone de classification contient trois panneaux, chacun représentant l'un des trois cluster à construire. Sur chaque panneau, chaque cube gris et bleu affiche pour la variable les valeurs moyennes de tous les sujets actuellement présents dans le cluster. Lorsqu'un sujet est ajouté à un cluster, sa couleur passe au rouge.*

FIGURE 4.3 – *Description des trois zones distinctes de l'environnement de travail : l'environnement est conçu pour faciliter l'analyse des données et les tâches de clustering.*



Figure 4.4 – *Illustration indiquant les boutons utilisés sur la Manette Meta Quest Pro.*

variables (figures 4.2(a) et 4.2(b)) sont automatiquement détruits quelques secondes après avoir été lâchés par l'utilisateur. Lorsqu'un sujet est saisi du tableau des sujets, une nouvelle copie est automatiquement générée pour le remplacer sur le tableau. Lorsqu'une variable est saisi de la table de travail, une nouvelle copie de cette variable est instantanément créée sur le socle orange pour maintenir l'analyse du sujet. Lors de l'expérience, nous avons utilisé des manettes Meta Quest Pro (voir la figure 4.4). Pour saisir un objet, l'utilisateur place la manette à l'intérieur de l'objet virtuel et maintient le bouton GRIP enfoncé. Pour relâcher l'objet, il lui suffit de relâcher le bouton GRIP.

L'environnement comprend également des éléments sans rapport avec la tâche de clustering et l'analyse des données. Ils servent de leurres et suscitent chez les utilisateurs des comportements qui ne sont pas liés à la tâche. Il existe de nombreux objets non interactifs (tels qu'un casque RV, un canapé et plusieurs plantes) et des objets interactifs (notamment des tasses et des tampons de bureau que l'on peut saisir, ainsi qu'un ventilateur que l'on peut allumer et éteindre). Ces éléments sont significatifs car ils sont traités avec la même importance par nos systèmes d'aide, garantissant une approche task-blind.

4.2.2 Récupération des données

Comme pour notre première expérience (voir la sous-section 3.2.1), le système recueille périodiquement des informations sur les mouvements, le comportement et les actions des participants. Nous avons besoin de ces données pour deux raisons principales : 1) en tant qu'apport de connaissance humaine pour nos systèmes d'aide task-blind, permettant de fournir un retour visuel ; 2) pour l'analyse des résultats, afin de comprendre le comportement humain et d'évaluer l'expérience. Les mouvements du corps et des yeux sont donc enregistrés périodiquement dans un fichier de données utilisateur. Ces données brutes de l'utilisateur sont analysées périodiquement pour déterminer si une nouvelle action (interprétable par le système) a été effectuée (voir la

sous-section 4.3.5 pour plus de détails). Nous avons défini trois actions possibles :

1. **Actions de NAVIGATION** : déclenchées lorsque la tête du participant se déplace d'au moins 50 cm dans n'importe quelle direction. L'utilisateur peut marcher librement dans une zone de $5 \times 3,5m^2$. Cette action enregistre la distance parcourue.
2. **Actions de COUP D'ŒIL** : déclenchées lorsque les participants regardent un objet. Cette action enregistre la cible que l'utilisateur a regardée et la durée pendant laquelle il l'a regardée.
3. **Actions de MANIPULATION** : déclenchées lorsque les participants saisissent ou relâchent un objet. Cette action enregistre le nom de l'objet, s'il a été saisi ou relâché, et quelle main a effectué l'action.

Ces trois actions ont été sélectionnées parce qu'elles correspondent aux interactions clefs classiques des utilisateurs dans un environnement virtuel : navigation, sélection et manipulation (D. BOWMAN et al., 2004 ; D. A. BOWMAN & HODGES, 1999). Les actions identifiées sont enregistrées dans un historique distinct, complémentaire à celui des données brutes. Ces deux historiques sont accessibles et servent de base aux autres algorithmes du système.

4.2.3 Description des aides

Nous avons développé trois versions d'un système d'aide task-blind que nous souhaitons évaluer, et que nous décrivons dans la sous-section 4.2.4. Ces trois systèmes diffèrent en termes de déclenchement de l'aide, mais les aides visuelles générées sont exactement les mêmes. Nous commençons dans cette sous-section par décrire en détail les quatre aides possibles.

Les aides sont conçues uniquement pour fournir aux utilisateurs des informations sur leurs comportements. Elles ne fournissent aucune assistance pour la tâche de clustering. Plus précisément, elles visent à améliorer la métacognition des utilisateurs et leur conscience de leurs propres comportements et mécanismes de pensée (POHL, 2022). Les aides sont indépendantes les unes des autres et peuvent être affichées simultanément si le système d'aide le décide. La conception graphique et la mise en œuvre de toutes les aides s'inspirent des pratiques courantes dans les jeux vidéo et en RV (DILLMAN et al., 2018). Il existe quatre aides :

- **Une aide SURBRILLANCE** : lorsqu'elle est activée, cette aide agit à plusieurs niveaux. Tant sur la table de travail que sur les panneaux de classification, elle met en surbrillance 6 variables : les trois avec lesquelles l'utilisateur a le plus interagi (indiquées en vert) et les trois avec lesquelles il a le moins interagi (indiquées en rouge). Ces données sont calculées en prenant en compte toutes les variables et tous les sujets. Dans les panneaux de classification uniquement, l'ordre des variables est également modifié ; elles sont triées de celle avec laquelle l'utilisateur a le plus interagit à celle avec laquelle il a le moins interagit. Au niveau de la table de travail, lorsqu'une variable particulière est saisie, l'assistant fournit des informations supplémentaires sur l'interaction avec cet objet : nombre de regards, nombre de saisies, etc. Certains de ces effets sont illustrés dans la figure 4.5(a).

L'aide est uniquement basée sur les actions de l'utilisateur et n'est pas une indication des variables à prendre en compte pour le clustering. Cette aide est présentée aux participants comme un feedback pendant leur processus de réflexion, sur la manière dont ils interagissent avec les objets de l'environnement ayant une structure complexe.

- **Une aide PROGRESSION D'INTERACTION** : cette aide active une fenêtre affichant une valeur comprise entre 0% et 100%, comme indiqué dans la figure 4.5(b). Cela représente la progression de l'interaction (regarder ou interagir avec) pour tous les objets instanciés dans la scène. Cela inclut tous les objets non liés à la tâche, toutes les variables de tous les sujets et tous les objets de l'environnement virtuel. Cette aide est présentée aux participants comme un feedback sur leur degré d'exploration de l'environnement et non sur l'achèvement de la tâche de clustering.
- **Une aide CONCENTRATION** : cette aide applique un effet de vignettage sur la vision du participant afin d'obscurcir la vision périphérique et de se concentrer sur ce qui se trouve devant lui, comme l'illustre la figure 4.5(c). Lorsque cette aide est activée, l'effet de vignettage apparaît en fondu quand l'utilisateur regarde des éléments dans la même zone (tableau des sujets, table de travail, zone de classification ou des objets de distractions) pendant plus de 8 secondes. Les zones sont les trois zones (tableau des sujets, table de travail et zone de classification), ainsi qu'une quatrième qui inclut tout objet qui n'est pas connecté aux trois autres zones. Lorsque l'utilisateur change de centre d'attention pendant plus de $1,5$ secondes, l'effet de vignettage disparaît. Cette aide est présentée aux participants comme un feedback indiquant qu'ils se concentrent sur un élément de la scène.
- **Une aide REGARD** : lorsqu'elle est activée, cette aide permet un comportement spécifique pour les objets saisissables dans la scène. Quand l'utilisateur les regarde, les objets sont agrandis de 15% et reprennent leur taille normale lorsque le regard de l'utilisateur quitte l'objet, comme l'illustre la figure 4.5(d). Cette aide est présentée aux participants comme un feedback les informant de ce qu'ils regardent dans la scène.

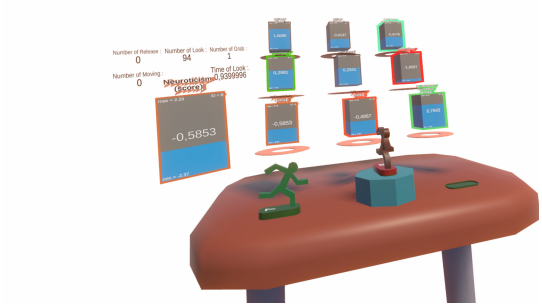
Chaque fois qu'une aide est activée ou désactivée, une petite fenêtre contextuelle apparaît dans le champ de vision de l'utilisateur pour lui notifier.

4.2.4 Description des systèmes d'aide

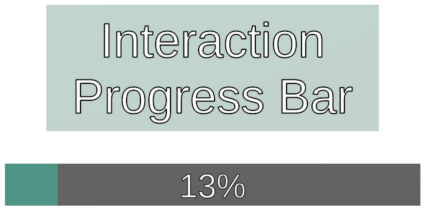
De la même manière que pour le chapitre 3, la décision d'afficher ou non une aide est prise selon une boucle de perception, décision, action (cf. sous-section 2.1.1). Le système d'aide détermine quand activer ou désactiver chacune des quatre aides décrites dans la section précédente. Les trois systèmes d'aide diffèrent de par la manière dont ils calculent le moment et l'aide spécifique à afficher. Les trois systèmes d'aide sont task-blind et utilisent les données collectées en continu (cf. sous-section 4.2.2).

Ainsi, nous considérons quatre variantes de notre système :

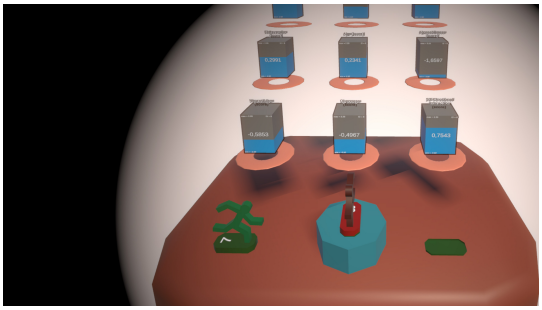
SANS AIDE Aucun système d'aide n'est actif, ce qui signifie que les utilisateurs ne



(**a**) *Mise en surbrillance des six variables avec lesquelles l'utilisateur a le plus et le moins interagit sur l'ensemble des sujets. Les gradients de vert et de rouge correspondent respectivement aux variables avec lesquelles l'utilisateur a le plus et le moins interagit. Lorsqu'un objet est saisi, cette aide donne également des détails sur les interactions réalisées avec cet objet.*



(**b**) *Barre de progression qui apparaît dans l'environnement pour fournir des informations sur l'exploration de l'utilisateur.*



(**c**) *Effet de vignettage qui indique à l'utilisateur une concentration sur un objet ou une zone spécifique.*



(**d**) *Changement de taille appliqué à l'objet que l'utilisateur est en train de regarder (dans cet exemple, l'objet de droite). La taille de l'objet augmente lorsqu'il est regardé et reviens à sa taille initiale lorsqu'il ne l'est plus.*

FIGURE 4.5 – *Les différentes aides visuelles qui peuvent apparaître dans la scène. Elles peuvent être activées ensemble si le système d'aide le décide.*

voient aucune des aides pendant leur tâche de clustering.

MANUEL Le déclenchement des aides est entièrement contrôlé par les utilisateurs. Via certains boutons de la manette, ils ont le contrôle total et peuvent activer ou désactiver n'importe quelle aide à tout moment. Ils décident quand, pourquoi et quelle aide est affichée.

ALÉATOIRE Le déclenchement des aides est entièrement contrôlé par le système, qui les active ou désactive à intervalles aléatoires. La sélection de l'aide à afficher (ou la décision de ne pas aider) est également aléatoire. Le délai entre deux décisions du système varie aléatoirement entre 15 et 60 secondes.

CONFIANCE Le déclenchement de l'aide est contrôlé par le système, sur la base d'une mesure plus sophistiquée que la variation ALÉATOIRE. Cette mesure, appelée

CONFIANCE, a été conçue en s'inspirant de la littérature sur la confiance envers ses propres capacités. Même si le lien entre confiance et performance serait un sujet intéressant à étudier, il est complexe (DOVE et al., 2020 ; HOFFRAGE, 2022 ; MURAD et al., 2016) et n'est pas adressé ici. Cette variation du système ne prétend donc pas mettre en œuvre une estimation correcte de la confiance, et notre mesure ne fait que s'inspirer de la littérature sur le sujet. Partant de l'hypothèse simplifiée selon laquelle une trop grande confiance ou une trop basse confiance peut altérer les performances, le système vise à déclencher les aides de façon à réguler la confiance. Cette métrique est calculée en quatre étapes par le processus suivant :

1. Au cours de la phase 2 du protocole, l'entraînement en RV (voir la sous-section 4.3.2), deux exercices de calibration sont effectués pour mesurer la vitesse de déplacement et le temps de réflexion de l'utilisateur. Dans un premier temps, l'utilisateur est invité à saisir un cube et à le placer à un endroit différent, tandis que sa vitesse de déplacement est enregistrée. Ensuite, l'utilisateur doit utiliser un cube pour choisir la réponse dans un questionnaire à choix multiple sur une question mathématique, tandis que le temps de réponse est enregistré. Ces exercices sont répétés sur trois niveaux de difficulté et à chaque niveau de difficulté est associé un niveau de confiance (confiance = 0 pour une difficulté élevée, confiance = 0,5 pour une difficulté moyenne, confiance = 1 pour une difficulté basse). Chaque niveau de difficulté est testé quatre fois pour chaque exercice.

2. Une fois la calibration terminée, le système effectue deux régressions quadratiques - l'une pour la confiance dans le mouvement et l'autre pour la confiance dans la réflexion - en utilisant respectivement les 12 valeurs enregistrées de la vitesse de déplacement, et du temps de réponse. Il en résulte les deux équations suivantes :

$$Conf_{Ref}(t) = \alpha_U^{Ref} * t^2 + \beta_U^{Ref} * t + C_U^{Ref} \quad \text{(EqRef)}$$
$$Conf_{Mvt}(v) = \alpha_U^{Mvt} * v^2 + \beta_U^{Mvt} * v + C_U^{Mvt} \quad \text{(EqMvt)}$$

   pour un utilisateur donné U avec un temps de réflexion t et une vitesse de déplacement v. Les composants α, β et C sont les coefficients obtenu par la régression quadratique pour chaque utilisateur et chaque équation.

3. Au cours de l'expérience, chaque fois que l'utilisateur déplace un objet ou fait une pause pour réfléchir, le système calcule une valeur de vitesse ou de temps et l'applique aux équations EqMvt et EqRef pour déterminer et stocker une valeur de confiance comprise entre 0 et 1.

4. Enfin, le système vise à maintenir la métrique de confiance dans l'intervalle de valeurs $[0,3, 0,7]$. Cet intervalle a été choisi afin de maintenir l'utilisateur dans un niveau de confiance neutre. Si la valeur de confiance sort régulièrement de cet intervalle, le système ajuste les aides ainsi : lorsque la confiance dans la réflexion est faible, le système active CONCENTRATION s'il n'est pas déjà activé et désactive SURBRILLANCE s'il n'est pas déjà désactivé. Lorsque la confiance dans la réflexion est élevée, le système fait l'inverse. Lorsque la

confiance dans le mouvement est faible, le système active REGARD s'il n'est pas déjà activé et désactive PROGRESSION D'INTERACTION s'il n'est pas déjà désactivé. Lorsque la confiance dans le mouvement est élevée, le système fait l'inverse. Lorsqu'un niveau de confiance se situe dans l'intervalle $[0,3, 0,7]$, aucun changement n'est appliqué aux configurations d'aide en cours.

Les étapes 1) et 2) sont effectuées une fois pendant la phase d'entraînement, tandis que les étapes 3) et 4) sont exécutées en continu tout au long de l'expérience. Dans cette variante, l'activation et la synchronisation des aides sont donc dictées par le système mais basées sur le comportement de l'utilisateur.

Cette section présente ainsi une vue d'ensemble de la conception des variantes de notre système d'aide. Au-delà de la logique de base, nos trois variantes du système d'aide sont utilisées pour explorer deux facteurs de conception principaux : le *Contrôle Utilisateur* et le *Timing Aide*.

Contrôle Utilisateur fait référence au degré de contrôle de l'utilisateur sur l'activation du système d'aide. Dans le système MANUEL, les utilisateurs peuvent contrôler l'activation du système d'aide, tandis que dans ALÉATOIRE et CONFIANCE, les utilisateurs n'ont aucun contrôle sur l'activation du système. En termes de conception, MANUEL est considéré comme un système actif, tandis que ALÉATOIRE et CONFIANCE sont considérés comme des systèmes passifs. *Timing Aide* fait référence au moment d'apparition de l'aide. Dans le système ALÉATOIRE, le timing des aides est aléatoire et donc imprévisible, alors que dans MANUEL et CONFIANCE, le timing des aides est basé sur le raisonnement humain (la logique de l'utilisateur dans MANUEL, la logique du concepteur dans CONFIANCE). Par conséquent, ALÉATOIRE est considéré comme non régulé, tandis que MANUEL et CONFIANCE sont considérés comme régulés. Toutes ces caractéristiques de conception sont résumées dans le tableau 4.1.

	Contrôle Utilisateur	*Timing Aide*
ALÉATOIRE	Passif	Non régulé
MANUEL	Actif	Régulé
CONFIANCE	Passif	Régulé

TABLE 4.1 – *Résumé des caractéristiques de conception de nos trois variantes. Voir la sous-section 4.2.4 pour les définitions, la sous-section 4.3.1 pour les hypothèses associées et la section 4.5 pour la discussion.*

Dans la section suivante, nous décrivons les hypothèses et le protocole utilisé pour évaluer l'efficacité de ces variations de systèmes task-blind.

4.3 Conception de l'expérience

L'objectif principal de cette étude est de comparer diverses approches task-blind de plusieurs points de vue et d'identifier les caractéristiques de conception susceptibles d'améliorer les performances. Comme indiqué dans la sous-section 4.2.1, nous avons choisi comme cas d'utilisation une tâche de clustering en Immersive Analytics. Nous avons élaboré un protocole expérimental pour examiner les variations de performance,

de comportement, d'exploration et de capacités cognitives des participants. Cette section fournit un descriptif complet de la conception de l'expérience : les hypothèses, le protocole utilisé, la configuration choisie et les participants à l'étude.

4.3.1 Hypothèses

Outre les données collectées par nos différentes couches du système au cours de l'expérience, trois mesures principales sont utilisées pour évaluer les performances : le TEMPS DU CLUSTERING, qui mesure le temps nécessaire à l'utilisateur pour effectuer la tâche de clustering ; l'EXACTITUDE DU CLUSTERING, qui est le ratio des sujets correctement classés par rapport au nombre total de sujets ; et la PRÉCISION DU CLUSTERING, qui est le ratio des sujets correctement classés par rapport au nombre de sujets classés. En effet, les utilisateurs sont censés classer les 12 sujets, mais ils ne sont pas obligés de le faire. Ils peuvent choisir de ne pas classer certains sujets s'ils trouvent la tâche trop difficile. Cette flexibilité se traduit par différentes stratégies et par des scores différents pour l'EXACTITUDE DU CLUSTERING et la PRÉCISION DU CLUSTERING. Nous évaluons aussi l'expérience de l'utilisateur, en nous concentrant sur des aspects clefs tels que le sentiment de présence, l'immersion et la réponse émotionnelle. Dans ce travail exploratoire, nous analysons également le comportement au moyen de plusieurs variables afin de mieux comprendre comment et pourquoi il peut y avoir des différences entre les groupes (voir la sous-section 4.3.2 et le tableau 4.2 pour plus de détails).

Les hypothèses de cette étude se formulent comme suit :

- L'hypothèse H1 postule qu'*il existe* au moins une approche de conception pour un système d'aide task-blind qui est capable d'améliorer les performances des utilisateurs. En d'autres termes, nous émettons l'hypothèse que

$$\begin{aligned} &\exists\ S \in\ \mathcal{S}_{Task-Blind}, \\ &Performance(S)\ >\ Performance(S_{\emptyset}) \end{aligned} \tag{H1}$$

  où $\mathcal{S}_{Task-Blind}$ représente l'ensemble de tous les systèmes d'aide task-blind, $S_{\emptyset}$ le système sans aide, et $Performance$ une fonction attribuant à chaque système un score basée sur l'EXACTITUDE DU CLUSTERING, la PRÉCISION DU CLUSTERING et le TEMPS DU CLUSTERING.

- Pour l'hypothèse H2, nous cherchons à comprendre *quels facteurs de la conception* contribuent à l'amélioration des performances. Comme indiqué dans la sous-section 4.2.4 et le tableau 4.1, nous étudions deux facteurs susceptibles d'influencer l'efficacité de nos systèmes d'aide : le *Contrôle Utilisateur* et le *Timing Aide*. Nous émettons l'hypothèse que les facteurs de conception peuvent affecter le comportement de l'utilisateur différemment, et donc que les performances seront différentes d'un groupe à l'autre. Un minimum de trois variantes était nécessaire pour pouvoir évaluer lequel de ces deux facteurs influence la performance. La représentation des aides (apparence, animation, conception auditive, etc.) influence également le comportement et la performance, mais dans notre étude, toutes les variantes utilisent les mêmes aides, ce qui nous permet d'ignorer ce facteur et son impact sur nos résultats. H2 peut être résumée plus formellement

par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} &\forall\ S \in\ \mathcal{S}_{Task-Blind}, \\ &Performance(S) = f(UserControl_S,\ HelperTimings_S) \end{aligned} \tag{H2}$$

où $UserControl_S$ et $HelperTimings_S$ représentent les deux facteurs de conception (*Contrôle Utilisateur* et le *Timing Aide* respectivement) du système S. Les autres éléments sont tels que définis dans H1.

- Pour l'hypothèse H3, nous cherchons à comprendre *pourquoi* un système d'aide task-blind peut améliorer les performances malgré l'absence de connaissances spécifiques sur la tâche de l'utilisateur. Nous supposons qu'un tel système favorise un état cognitif amélioré chez l'utilisateur, désigné par ECS (voir la sous-section 2.3.3). Nous émettons donc l'hypothèse que le système d'aide task-blind crée un environnement qui stimule les capacités cognitives de l'utilisateur, ce qui a pour conséquence une amélioration des performances. H3 peut être résumée plus formellement par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \forall S \in \mathcal{S}_{Task-Blind}\ \text{tel que}\quad &Performance(S)\ >\ Performance(S_\emptyset), \\ &ECS(S) \nearrow \implies Performance(S) \nearrow \end{aligned} \tag{H3}$$

où ECS est une fonction attribuant à chaque système un score basé sur l'évolution cognitive de l'utilisateur due à ce système, et où les autres éléments sont tels que définis dans H1.

Dans cette étude, nous testons ces trois hypothèses en analysant les performances et le comportement des utilisateurs de nos trois systèmes d'aide task-blind.

4.3.2 Protocole expérimental

L'expérience se déroule en six phases : 1) Premier Attentional Blink Test, 2) Entraînement en RV, 3) Expérience de clustering en RV, 4) Second Attentional Blink Test, 5) Questionnaire d'expérience virtuelle (IVEQ) et 6) Questionnaire sur le clustering et les aides. Ces six phases, ainsi que leur temps moyen, sont illustrés en figure 4.6. En moyenne, l'expérience a duré 70 minutes. L'ensemble des étapes se déroule dans la même pièce et les participants doivent d'abord remplir un formulaire de consentement éclairé.

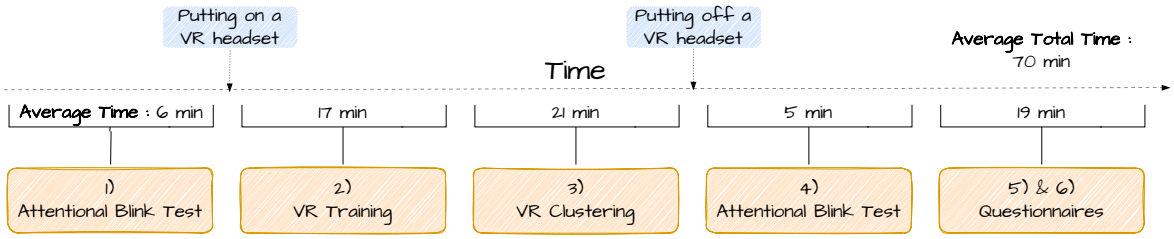


FIGURE 4.6 – *Représentation graphique des six phases de notre protocole, ainsi que du temps moyen de de chaque phase. L'utilisateur met le casque de RV entre la phase 1 et 2, puis le retire entre la phase 3 et 4.*

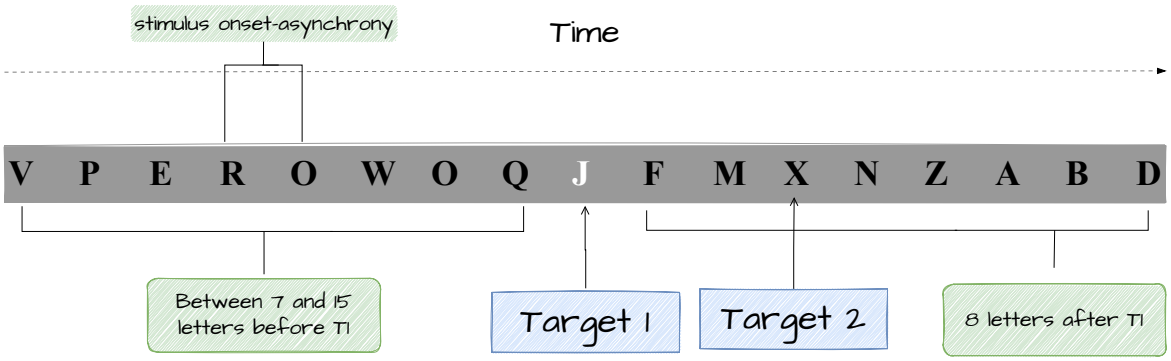


FIGURE 4.7 – *Exemple d'un essai pour le Attentional Blink Test, adapté de* (KOZHEVNIKOV *et al.*, 2018). *Les lettres noires apparaissent successivement au milieu d'un écran entièrement gris. Seule Target 1, la première cible de l'exercice, est blanche, et seule Target 2, la seconde cible de l'exercice, est un « X ». L'asynchronie stimulus-apparition (« stimulus-onset asynchrony » en anglais) est fixée à 100 ms, et chaque lettre est affichée pendant 16,7 ms. Il y a entre 7 et 15 lettre avant l'apparition de Target 1, et 8 lettres après.*

1) Premier Attentional Blink Test Les participants passent un « Attentional Blink Test » (ABT) sur un ordinateur portable. Ce test est utilisé pour mesurer les capacités cognitives du participant à un instant donné et les résultats sont utilisés pour étudier un potentiel ECS. Le test consiste à identifier deux lettres cibles dans une succession de lettres qui défilent rapidement, la performance diminuant généralement de manière significative pour la deuxième lettre - un phénomène connu sous le nom d'« attentional blink » (SHAPIRO et al., 1997). Plus précisément, la capacité à identifier la deuxième cible est compromise lorsque les deux cibles apparaissent entre 200 et 500 ms l'une de l'autre (DUX & KELLY, 2012). Dans notre étude, les participants voient une série de lettres se succédant rapidement les unes aux autres au centre de l'écran sur un fond gris. Il leur est ensuite demandé de signaler : (a) l'identité de la seule lettre blanche (première cible, notée Target 1), qui apparaît aléatoirement entre la septième et la quinzième position de la série, et (b) s'ils ont vu la lettre noire « X » (deuxième cible, notée Target 2), qui apparaît dans les huit lettres qui suivent Target 1 et dans seulement 50% des essais (voir la figure 4.7 pour la visualisation d'un essai).

Nous avons adapté l'ABT de KOZHEVNIKOV et al. (2018) et RAYMOND et al. (1992) en utilisant Python v3.8.10 et PsychoPy v2024.1.5[1]. Cette configuration permet d'étudier l'apparition potentielle de ECS (voir la sous-section 4.3.1 pour plus de détails sur nos hypothèses). Target 2 apparaît en position 2, 3, 4 ou 7 après Target 1, ce qui correspond à des décalages de 200 ms, 300 ms, 400 ms et 700 ms, respectivement. Cela permet d'effectuer des tests avec Target 2 apparaissant à la fois dans la fenêtre de clignement attentionnel (lag2, lag3 et lag4) et en dehors (lag7) (RAYMOND et al., 1992). Le test complet consiste en 12 essais par décalage, ce qui donne un total de 48 essais pour l'Attentional Blink Test.

2) Entraînement en RV Les participants commencent leur immersion dans l'environ-

1. Lien de référence PsychoPy : https://psychopy.org/index.html, Date de dernière consultation le : 29/01/2025

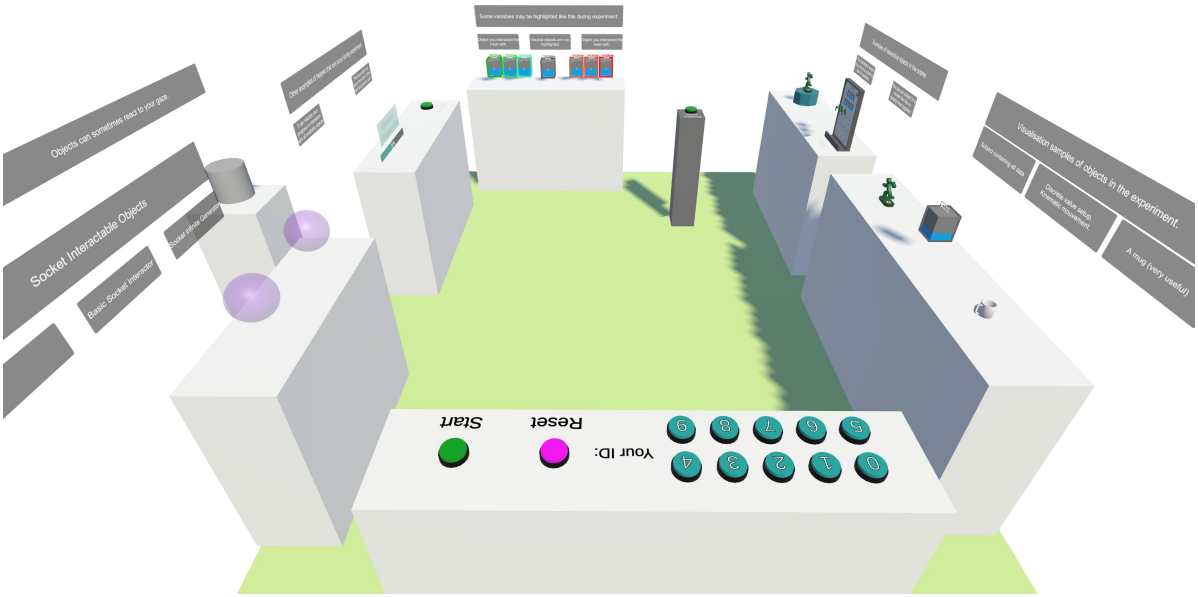


FIGURE 4.8 – *Salle d'entraînement : chaque table montre des informations et des exemples liés à la phase de clustering à venir.*

nement virtuel dans une salle d'entraînement où ils peuvent se familiariser avec la marche, l'interaction avec les objets et la manipulation des éléments qu'ils rencontreront au cours de la tâche de clustering. Tous les participants effectuent un exercice de calibrage axé sur le mouvement (déplacement d'un cube) et la réflexion (réponse à une question mathématique) (voir dans la sous-section 4.2.4, la description du groupe CONFIANCE pour plus de détails). Ils sont ensuite guidés à travers chaque zone de l'environnement virtuel (voir la figure 4.8), reçoivent des informations détaillées sur la tâche de clustering et sont initiés aux effets visuels et à l'interprétation de chacune des quatre aides possibles (voir la sous-section 4.2.3). Ils sont encouragés à poser toutes les questions qu'ils souhaitent et peuvent passer à la phase suivante quand ils le désirent.

3) **Expérience de clustering en RV** Les participants doivent explorer l'environnement de manière autonome et accomplir la tâche de clustering décrite dans la sous-section 4.2.1. En fonction du groupe auquel ils sont affectées, les aides peuvent être activées soit par le système, soit par les participants eux-mêmes.

4) **Second Attentional Blink Test** L'exercice de la phase 1 est répété. Un minimum de 30 minutes s'est écoulé entre le premier et ce second test d'attention.

5) **Questionnaire d'expérience virtuelle (IVEQ)** Les participants remplissent le questionnaire IVEQ (TCHA-TOKEY, 2018) (présent en annexe A), conçu pour recueillir leurs ressentis concernant l'utilisabilité et l'expérience utilisateur.

6) **Questionnaire sur le clustering et les aides** La dernière série de questions porte sur la perception qu'ont les participants de la tâche et de l'efficacité des aides. Les participants se positionnent, à l'aide d'une échelle de Likert en cinq points,

sur les trois affirmations suivantes : « *Je me suis souvent senti frustré lors de ma classification* », « *Les aides sont apparues quand j'en avais besoin* », et « *Les aides ont été utiles à mon travail* ». En plus, trois questions ouvertes sont incluses pour recueillir des informations qualitatives sur les stratégies utilisées par les participants : « *Est-ce que certains sujets étaient difficiles à classer ? Si oui, pourquoi ?* », « *Pourquoi n'avez-vous pas classé certains sujets ?* » , et « *Quelle a été votre stratégie de classification ?* ». Ces questions sont conçues pour obtenir des informations sur l'impact potentiel de notre cas d'utilisation spécifique, *i.e.* la tâche de clustering.

4.3.3 Participants

Cette étude a impliqué 56 participants (36 hommes et 20 femmes), âgés de 19 à 62 ans (âge moyen : 34,7). Les participants, principalement des étudiants ou des membres du personnel de l'Université de Montpellier, étaient des volontaires ayant une vue normale ou corrigée à la normale (46,6% portaient des lunettes ou des lentilles de contact). La plupart avait une expérience minimale de la RV (63,8%), et une grande partie n'avait aucune expérience préalable de la RV (27,6%). Aucun des participants n'a signalé avoir de problèmes de mémoire immédiate ou à long terme.

Cette expérience a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université de Montpellier, avis N°UM 2023-034bis.

4.3.4 Procédure

L'étude a une conception inter-sujets (« between-subjects design » en anglais). Les participants ont été répartis aléatoirement dans l'un des quatre groupes : SANS AIDE, ALÉATOIRE, MANUEL et CONFIANCE. Le protocole était identique pour chaque groupe et les participants ignoraient leur affectation jusqu'à la fin de l'étude. Chaque groupe comprenait 14 participants.

Pendant l'entraînement (phase 2), tous les groupes ont reçu des explications claires ainsi que des exemples des effets visuels et des interprétations associés à chacune des quatre aides. Les groupes SANS AIDE, ALÉATOIRE, et CONFIANCE ont été informés que c'était le système qui déterminerait si et quand les aides apparaîtraient. Les participants du groupe MANUEL ont été informés qu'ils pouvaient activer ou désactiver chaque aide à leur guise en utilisant les boutons PRIMAIRE, SECONDAIRE, CLIC DU JOYSTICK, et GÂCHETTE de chaque main pour activer respectivement les aides SURBRILLANCE, REGARD, CONCENTRATION, et PROGRESSION D'INTERACTION (voir la figure 4.4 pour le positionnement des boutons). Pour les groupes ALÉATOIRE et CONFIANCE, les aides étaient passives et ne nécessitaient aucune interaction de la part de l'utilisateur.

Pendant le clustering en RV (phase 3), les participants des groupes ALÉATOIRE, MANUEL et CONFIANCE ont reçu des aides visuelles de l'environnement. SANS AIDE a servi de groupe de contrôle et n'a donc reçu aucune assistance.

Tout au long des deux phases ABT (phases 1 et 4), du clustering (phase 3), du IVEQ (phase 5) et des questionnaires finaux (phase 6), les réponses ont été collectées et converties en scores. Ces scores correspondent à 33 variables utilisées pour l'analyse.

Ces variables sont directement liées à nos hypothèses, comme indiqué dans la sous-section 4.3.1, et sont résumées, ainsi que leur utilisation, dans le tableau 4.2.

4.3.5 Dispositif expérimental

Le casque utilisé était un Meta Quest Pro[2] avec un système de suivi oculaire infrarouge intégré, à une fréquence d'échantillonnage maximale de 72 Hz. Nous avons également utilisé des contrôleurs Meta Quest Pro pour toutes les interactions. Les participants pouvaient marcher librement dans une zone de $5 \times 3,5m^2$, aucun autre système de déplacement n'est disponible. L'interaction avec les objets de l'environnement, identique dans les quatre groupes, permettait aux utilisateurs de manipuler les données et de construire ou de modifier leur clustering. Lorsqu'ils se sentaient prêts, les participants commençaient l'expérience et étaient transportés dans l'environnement de clustering, la phase 3. Pendant cette phase, plusieurs ensembles de données étaient collectées à une fréquence de 50 Hz : la position de la tête, la position des mains, la direction du regard, l'objet cible du regard, le point d'impact du regard avec l'environnement, ainsi que l'état d'affichage des aides (actif ou non). Ces données brutes étaient analysées toutes les 2 secondes pour vérifier si une nouvelle action avait été effectuée. La logique de l'expérience, le système d'enregistrement, l'environnement virtuel et le système de RV ont été implémentés dans Unity[3], version 2022.3.3f1.

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
TEMPS DU CLUSTERING	P	Le temps nécessaire à l'utilisateur pour effectuer le clustering, en secondes.	H1
EXACTITUDE DU CLUSTERING	P	Le nombre de sujets correctement classés divisé par le nombre total de sujets.	H1
PRÉCISION DU CLUSTERING	P	Le nombre de sujets correctement classés divisé par le nombre de sujets classés.	H1

(*Le tableau continue à la page suivante*)

2. Lien de référence Meta Quest Pro : https://www.meta.com/fr/quest/quest-pro/, Date de dernière consultation le : 29/01/2025
3. Lien de référence Unity : https://unity.com/, Date de dernière consultation le : 04/12/2024

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
IVEQ VARIABLES	UX	Score moyen de toutes les réponses relatives à chaque catégorie du questionnaire IVEQ. Chaque réponse est évaluée sur une échelle de Likert en 10 points. Cela donne 8 variables : PRÉSENCE, ENGAGEMENT, IMMERSION, FLOW, ÉMOTION, JUGEMENT, CONSÉQUENCES, ADOPTION TECHNOLOGIE.	H2
FRUSTRATION	UX	Score indiquant la frustration ressentie par l'utilisateur face à la difficulté de la tâche. Réponse évaluée sur une échelle de Likert en 5 points.	H2
AIDES OPPORTUNES	UA - AA	Score indiquant la perception de l'aspect opportun des aides par l'utilisateur. Réponse évaluée sur une échelle de Likert en 5 points.	H2
NB AIDES ACTIVES	UA - AA	Nombre d'aides activées pendant la classification, tous types d'aides confondus.	H2
VARIABLES ACTIVATION	UA - AA	Nombre d'activations pour chaque type d'aide au cours de la classification. Cela donne 4 variables : NB ACTIVATION CONCENTRATION, NB ACTIVATION REGARD, NB ACTIVATION SURBRILLANCE, et NB ACTIVATION PROGRESSION D'INTERACTION.	H2
UTILITÉ AIDES	UA - DA	Score indiquant la perception de l'utilité des aides par l'utilisateur. Réponse évaluée sur une échelle de Likert en 5 points.	H2

(*Le tableau continue à la page suivante*)

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
VARIABLES USAGE	UA - DA	Temps d'utilisation relatif pour chaque type d'aide. Il correspond au temps pendant lequel l'aide a été activée pendant le clustering divisé par le temps du clustering. On obtient ainsi 4 variables : USAGE RELATIF CONCENTRATION, USAGE RELATIF REGARD, USAGE RELATIF SURBRILLANCE, et USAGE RELATIF PROGRESSION D'INTERACTION.	H2
NB SAISI	Ex - EC	Nombre d'actions de saisi effectuées par l'utilisateur. Normalisé par rapport au maximum réalisé sur l'ensemble des utilisateurs.	H2
NB NAVIGATION	Ex - EC	Nombre d'actions de NAVIGATION effectuées par l'utilisateur. Normalisé par rapport au maximum réalisé sur l'ensemble des utilisateurs.	H2
DISTANCE PARCOURUE	Ex - EC	Distance parcourue (en *mètres*) au cours de la phase 3.	H2
NB COUP D'ŒIL	Ex - EV	Nombre d'actions de COUP D'ŒIL effectuées par l'utilisateur. Normalisé par rapport au maximum réalisé sur l'ensemble des utilisateurs.	H2
VARIABLES SURFACE	Ex - EV	Surface (en m^2) explorée visuellement au cours de la phase 3. Mesurée pour l'ensemble de l'environnement et pour les trois zones : le tableau des sujets, la table de travail et la zone de classification. Cela donne 4 variables :SURFACE VISUELLE TOTALE, SURFACE VISUELLE TABLE, SURFACE VISUELLE TABLEAU, et SURFACE VISUELLE CLASSIF.	H2

(*Le tableau continue à la page suivante*)

Variable	Catégorie	Description	Hypothèses
PREMIER SCORE ABT	C	Score obtenu lors de la phase 1. La mesure principale de l'ABT est la détection exact de Target 2, à condition que Target 1 ait été identifié. Calculée pour chaque décalage (2, 3, 4 et 7) et notée Exactitude T2|T1.	H3
DEUXIÈME SCORE ABT	C	Score obtenu lors de la phase 4 et calculé exactement comme PREMIER SCORE ABT.	H3

TABLE 4.2 – *Résumé de toutes les variables générées au cours de notre expérimentation ainsi que des hypothèses, catégories (et sous-catégories) qui leur sont associées. P = Performance, UX = eXpérience Utilisateur, UA = Usage Aides, AA = Activation Aides, DA = Durée Aides, Ex = Exploration, EC = Exploration Corporelle, EV = Exploration Visuelle, C = Cognition.*

4.4 Résultats

Cette section met en évidence les résultats significatifs obtenus à partir de l'analyse statistique et de l'observation des graphiques. Étant donné le grand nombre de variables (voir le tableau 4.2 pour plus de détails), nous les avons regroupées par catégories. Nous présentons les résultats pour chaque catégorie.

4.4.1 Méthodologie d'analyse

Pour l'analyse statistique, Python 3.9.19 a été utilisé en combinaison avec les frameworks suivants : scipy v-1.13.1, scikit-bio v-0.6.2, et statsmodels v-0.13.2.

Comme indiqué précédemment, nous avons regroupé toutes les variables en cinq catégories : Performance (P), Usage Aides (UA), Exploration (Ex), Cognition (C) et eXpérience Utilisateur (UX). L'Usage Aides et l'Exploration sont chacune subdivisées en deux sous-catégories pour une analyse plus précise : respectivement Activation Aides (AA), Durée Aides (DA), et Exploration Corporelle (EC), Exploration Visuelle (EV). Toutes les catégories sont résumées dans le tableau 4.2. Le coefficient de corrélation de Pearson a été calculé pour déterminer les corrélations linéaires entre les variables.

Lors de l'évaluation d'une catégorie dans un cadre d'analyse uni-variée, la normalité a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Lorsque les hypothèses d'application d'analyse de la variance (ANOVA) à sens unique étaient satisfaites, le test ANOVA a été utilisé. Dans le cas contraire, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé.

Lors de l'évaluation d'une catégorie dans un cadre d'analyse multivarié, la normalité a été évaluée à l'aide du test de Henze-Zirkler. Lorsque les hypothèses d'application d'analyse multivariée de la variance (MANOVA) étaient satisfaites, le test MANOVA a été utilisé. Dans le cas contraire, le test non paramétrique d'analyse multivariée permutationnelle de la variance (PERMANOVA) a été utilisé.

La signification statistique a été considérée comme *forte* lorsqu'elle était inférieure à $0,05$ et *faible* lorsqu'elle était comprise entre $0,05$ et $0,1$.

4.4.2 Résultats

Dans cette section, nous présentons les variables qui présentent des différences statistiquement significatives entre les groupes.

Performance
Pour étudier les performances, les différences entre l'EXACTITUDE DU CLUSTERING, la PRÉCISION DU CLUSTERING et le TEMPS DU CLUSTERING ont été analysées à la fois dans un cadre uni-varié et multivarié, mais seul le cadre uni-varié a montré des résultats significatifs. Nous avons d'abord recherché une différence de performance entre SANS AIDE et les autres groupes, puis une différence de performance entre les trois systèmes d'aide. Les scores obtenus dans cette catégorie sont présentés en figure 4.9.

Une différence significative *forte* a été trouvée pour la PRÉCISION DU CLUSTERING entre les groupes SANS AIDE et MANUEL ($p = 0{,}042\,5$), ainsi qu'entre MANUEL et CONFIANCE ($p = 0{,}035\,6$). Nous notons que la différence entre CONFIANCE et MANUEL pour l'EXACTITUDE DU CLUSTERING a une valeur de $p = 0{,}101$, très proche (même si supérieure) de notre seuil de signification *faible*, . En général, le groupe MANUEL a obtenu les meilleurs résultats, tandis que CONFIANCE semble être le plus proche de SANS AIDE, comme le montre la figure 4.9. Même si ALÉATOIRE semble aussi avoir obtenu de meilleurs résultats que SANS AIDE, aucune différence significative n'a été constatée.

Usage Aides
Lors de l'étude de l'usage des aides, toutes les analyses ont été effectuées dans un cadre multivarié. Le groupe SANS AIDE a été ignoré car les utilisateurs de ce groupe n'ont reçu aucune aide. Nous avons donc recherché les différences entre les trois groupes aidés uniquement. Nous avons d'abord recherché des différences dans la catégorie générale Usage Aides, puis dans les sous-catégories Durée Aides et Activation Aides. Les scores obtenus dans cette catégorie sont présentés en figures 4.10, 4.11 et 4.12.

Une différence significative *forte* a été constatée entre ALÉATOIRE et les autres groupes aidés ($p = 0.014$), en particulier dans la sous-catégorie Durée Aides ($p = 0.004$). Une différence *forte* similaire a été observée lorsque l'on considère les différences entre CONFIANCE et les autres groupes aidés ($p = 0.024$), avec de même, une différence marquée dans la sous-catégorie Durée Aides ($p = 0.004$). Lorsque l'on examine directement les différences entre CONFIANCE et ALÉATOIRE uniquement, les résultats indiquent encore une fois une différence *forte* dans la catégorie Usage Aides ($p = 0.004$) ainsi que dans la sous-catégorie Durée Aides ($p < 0.00001$). Nous pouvons voir les différences pour

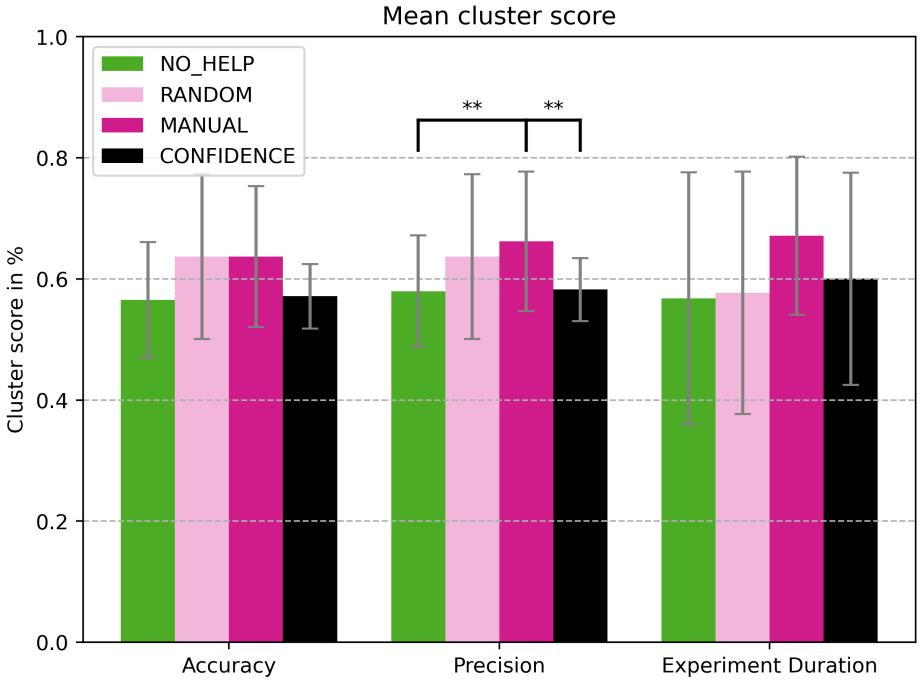


FIGURE 4.9 – *Résultats pour la catégorie **Performance**. Les variables « Accuracy », « Precision », et « Experiment Duration » correspondent respectivement à* EXACTITUDE DU CLUSTERING, *PRÉCISION DU* CLUSTERING, *et* TEMPS DU CLUSTERING. *Diagrammes en barres représentant les moyennes et les écarts-types pour chaque variable. Les différences significatives sont marquées par un ou deux astérisques pour faible et forte respectivement. Les couleurs utilisées sont les suivantes : le noir pour le groupe* CONFIANCE, *le rose foncé pour le groupe* MANUEL, *le rose clair pour le groupe* ALÉATOIRE, *et le vert pour le groupe* SANS AIDE.

chaque variable dans la sous-catégorie Durée Aides plus clairement dans les figures 4.10 et 4.11. Ces figures suggèrent que les utilisateurs du groupe CONFIANCE ont utilisé SURBRILLANCE et PROGRESSION D'INTERACTION plus longtemps, alors que les utilisateurs du groupe ALÉATOIRE ont utilisé les quatre types d'aides avec une durée équivalente.

Une différence significative *faible* a été constatée entre MANUEL et les autres groupes aidés ($p = 0.093$) dans la sous-catégorie Activation Aides. Cependant, une analyse deux à deux n'a révélé aucune différence significative entre MANUEL et chacun des autres groupes, suggérant que la différence n'est pas du à un groupe en particulier mais bien à un comportement spécifique de MANUEL par rapport à tous les autres. Les figures 4.11 et 4.12 suggèrent que, dans l'ensemble, MANUEL a activé moins d'aides et a des moments plus opportuns que les autres groupes, ce qui peut expliquer la différence significative. Cependant, les utilisateurs de ce groupe ont aussi davantage activé SURBRILLANCE, ce qui peut avoir contrebalancé cette différence, expliquant pourquoi la différence est au final considérée comme *faible* lors de l'analyse multivarié.

Exploration

Lors de l'étude de l'Exploration, toutes les analyses ont été effectuées dans un cadre multivarié. Nous avons d'abord recherché des différences dans la catégorie générale Ex-

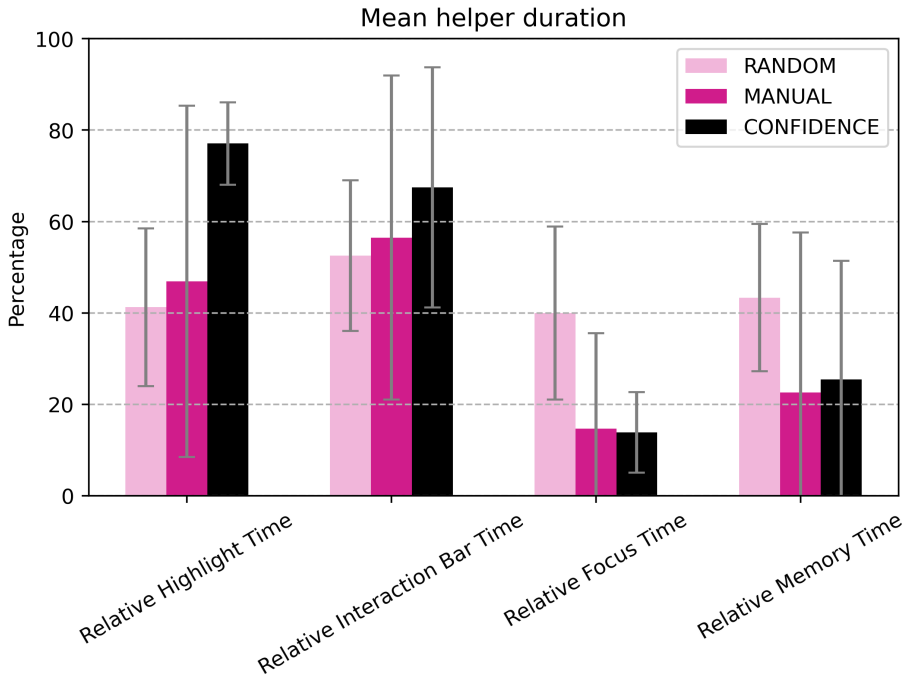


FIGURE 4.10 – *Résultats pour la catégorie **Durée Aides**. Les variables nommées en anglais sur l'axe des abscisses correspondent aux VARIABLES USAGE décrites dans le tableau 4.2. Le groupe SANS AIDE n'ayant pas eu d'aides, il n'est pas présent sur la figure. Les différences significatives étant présentes dans un contexte multivarié, elles ne sont pas représentées ici.*

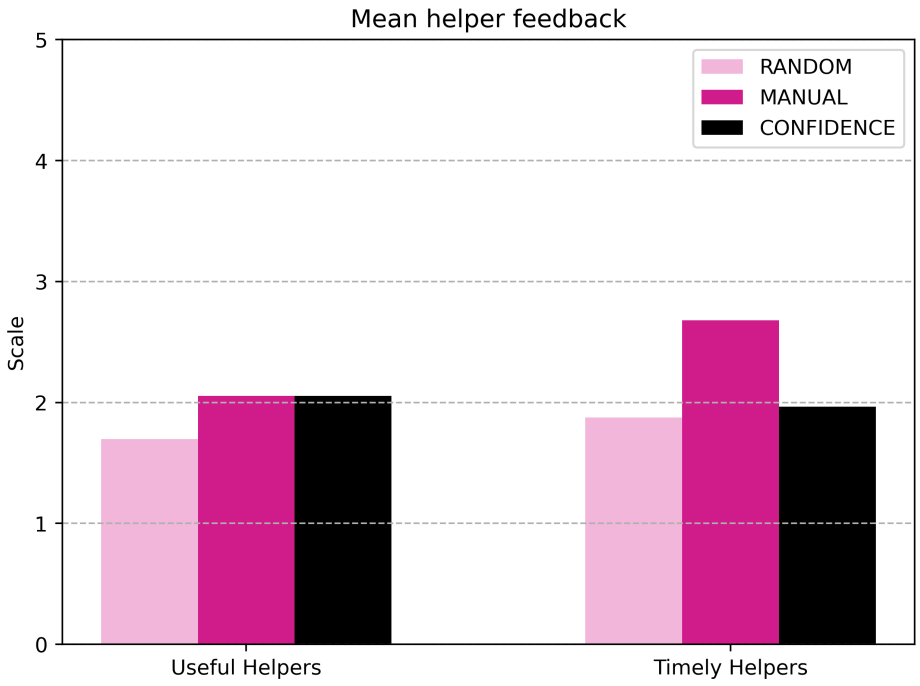


FIGURE 4.11 – *Résultats pour les deux variables UTILITÉ AIDES et AIDES OPPORTUNES décrites dans le tableau 4.2.*

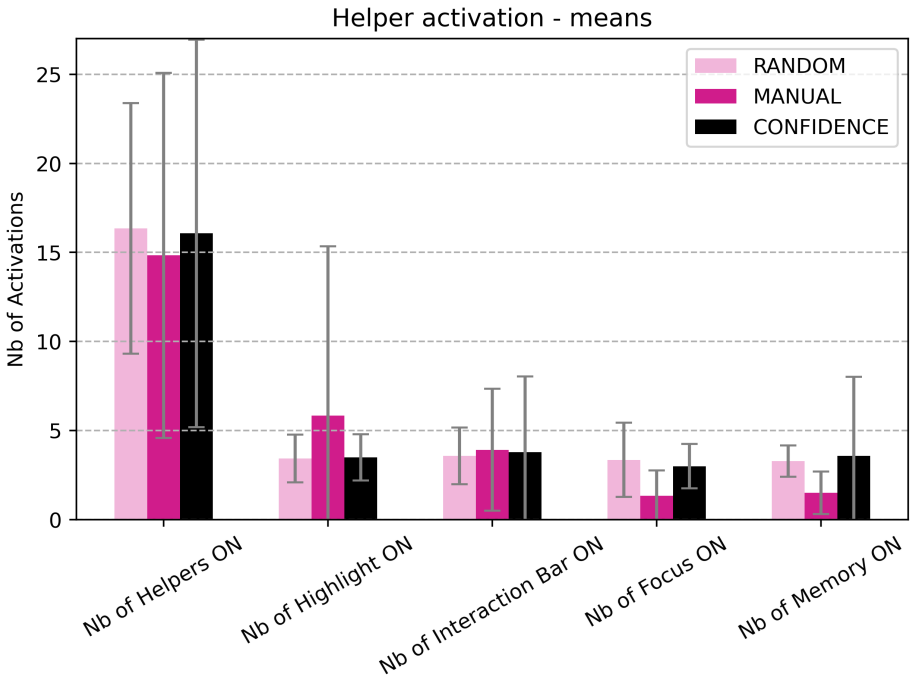


FIGURE 4.12 – *Résultats pour la catégorie **Activation Aides**. Les variables nommées en anglais sur l'axe des abscisses correspondent à* NB AIDES ACTIVES *et aux* VARIABLES ACTIVATION *décrites dans le tableau 4.2.*

ploration, puis dans les sous-catégories Exploration Corporelle et Exploration Visuelle. Les scores obtenus dans cette catégorie sont présentés en figure 4.13.

Une différence significative *faible* a été trouvée entre MANUEL et CONFIANCE ($p = 0{,}079\,4$). Cependant, lorsque l'on regarde quelles sous-catégories contiennent cette différence, aucune différence supplémentaire n'a été trouvée. Cela suggère que la différence entre MANUEL et CONFIANCE est bien répartie entre toutes les variables d'exploration et qu'elle n'est pas spécifiquement due à une sous-catégorie ou à une autre.

Aucune différence significative n'a été trouvée entre MANUEL et SANS AIDE lorsque l'on considère la catégorie générale Exploration, mais une analyse plus détaillée dans la sous-catégorie Exploration Visuelle a révélé une différence significative *faible* ($p = 0{,}072\,7$). Cela suggère qu'il existe une différence dans l'exploration visuelle entre les deux groupes, même si cette différence n'a pas affecté l'exploration générale de l'environnement. La figure 4.13 montre l'exploration visuelle des parties de l'environnement qui semblent présenter le plus de différences dans l'exploration. Cette figure suggère que la différence d'exploration visuelle entre les deux groupes réside principalement dans l'utilisation de la table de travail et du tableau des sujets.

Cognition

Pour la catégorie Cognition, le score mesuré aux étapes 1 et 4 de notre protocole est l'Exactitude T2|T1. Il est mesuré à chaque moment (avant et après) et pour chaque décalage (200ms, 300ms, 400ms, et 700ms) (voir la sous-section 4.3.2 et le tableau 4.2 pour plus de détails). Nous avons réalisé une ANOVA à mesure mixtes 2 (Temps :

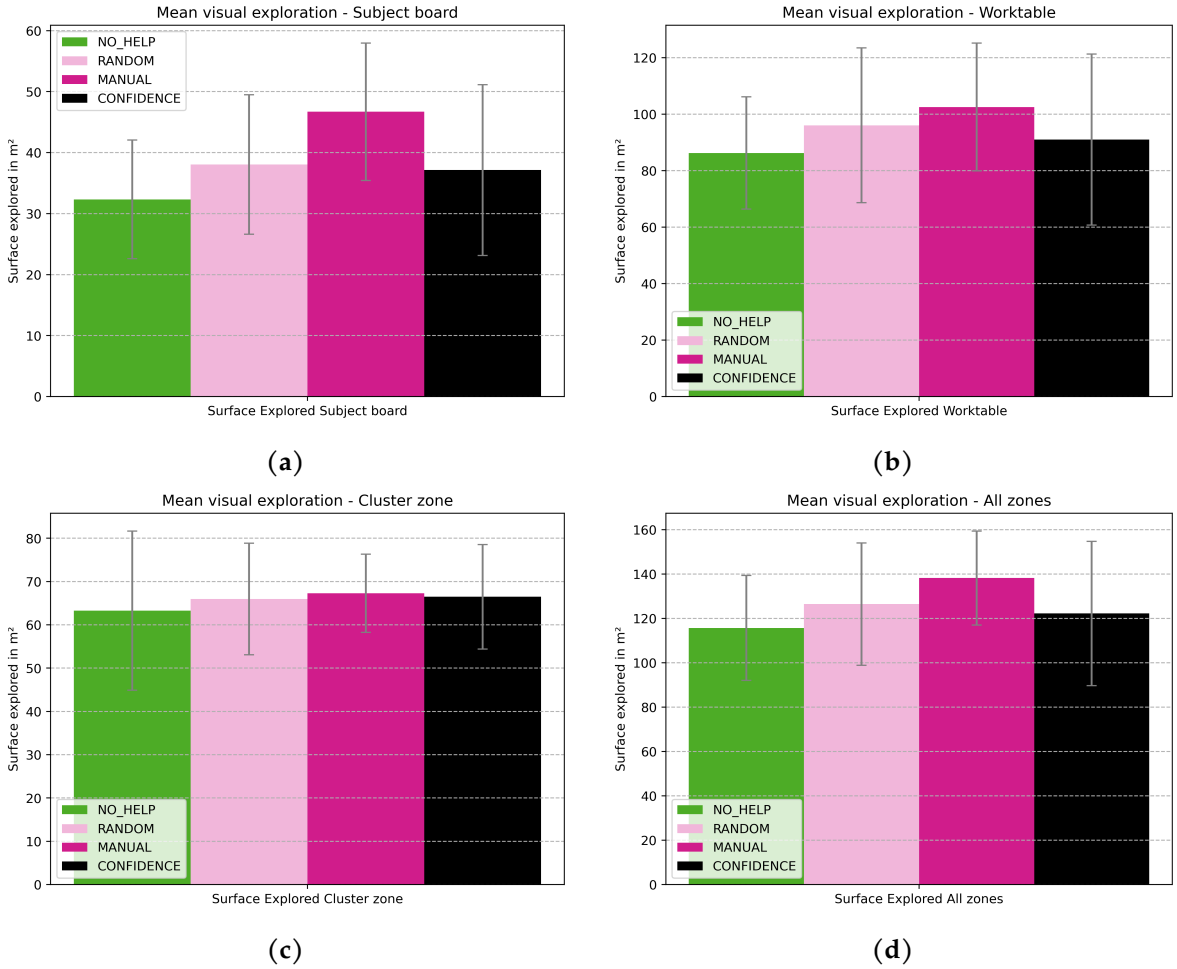


FIGURE 4.13 – *Résultats pour la catégorie* ***Exploration Visuelle****. L'exploration visuelle est ici représentée pour chacune des trois zones présentées en sous-section 4.2.1 ainsi que pour les zones fusionnées. 4.13(a), 4.13(b), 4.13(c) et 4.13(d) représentent respectivement les zones du tableau des sujets, de la table de travail, de la zone de classification, et les trois zones fusionnées. Il y a une différence significative faible entre* SANS AIDE *et* MANUEL *(non représentée sur les figures car obtenue dans un cadre multivarié).*

avant et après) $\times$ 4 (Décalage : 2, 3, 4 et 7) $\times$ 4 (Groupe : SANS AIDE, ALÉATOIRE, MANUEL et CONFIANCE) avec l'Exactitude T2|T1 sur tous les décalages comme variable dépendante. La normalité et l'homogénéité ont été validées respectivement à l'aide du test de Shapiro-Wilk ($p = 0{,}136$) et du test de Levene ($p = 0{,}996$). Nous avons recherché les effets des facteurs principaux ainsi que les effets d'interaction. Les scores obtenus dans cette catégorie sont présentés en figures 4.14, 4.15 et 4.16.

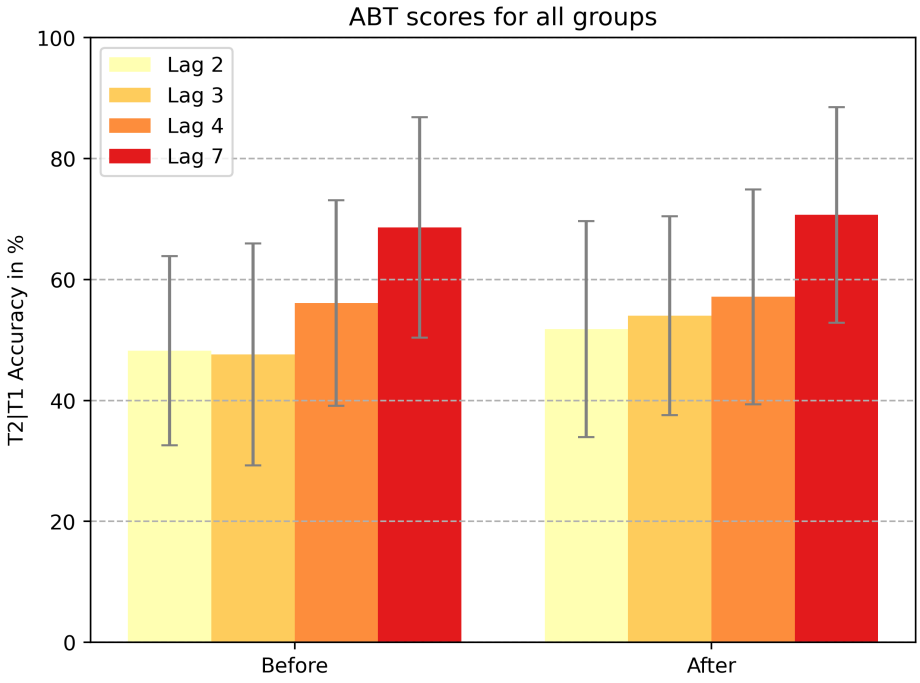


FIGURE 4.14 – *Scores d'attention avant et après l'expérience pour chacun des 4 décalages testés (2, 3, 4, et 7). La visualisation inclut ici tous les groupes mélangés. Les couleurs utilisées sont les suivantes : le rouge pour le décalage 7 (soit 700ms), le orange foncé pour le décalage 4 (soit 400ms), le orange clair pour le décalage 3 (soit 300ms), et le jaune pour le décalage 2 (soit 200ms). Pour chacun des deux instants (avant et après), il existe des différences significatives de performance entre les décalages ; et pour le même décalage, des différences significatives entre les instants (avant et après). Par souci de visibilité, ces différences significatives ne sont pas représentées (voir la sous-section 4.4.2 pour les détails).*

Comme attendu, l'ANOVA a montré un effet significatif *fort* du décalage ($F = 13{,}4$ et $p = 0{,}000\,285$), ce qui est cohérent avec l'effet de clignement attentionnel et les résultats précédents (RAYMOND et al., 1992 ; SHAPIRO et al., 1997). Comme le montre la figure 4.14, le décalage a un impact sur l'Exactitude T2|T1, le décalage 7 permettant par exemple d'obtenir un meilleur score.

L'ANOVA a également montré deux autres effets significatifs *fort* : un effet pour le Temps ($F = 7{,}71$ et $p = 0{,}005\,77$) et un effet d'interaction Temps-Décalage ($F = 5{,}45$ et $p = 0{,}020\,1$). Ceci suggère qu'il y a bien eu une amélioration de l'Exactitude T2|T1 après l'expérience et que cette amélioration dépend du décalage. En effet, comme nous pouvons le voir dans la figure 4.14, tous les décalages montrent (à des degrés différents) une amélioration après l'expérience. Selon KOZHEVNIKOV et al. (2018), cela suggère qu'il y a bien eu une amélioration de l'état cognitif dans notre expérience. Cependant, il n'y

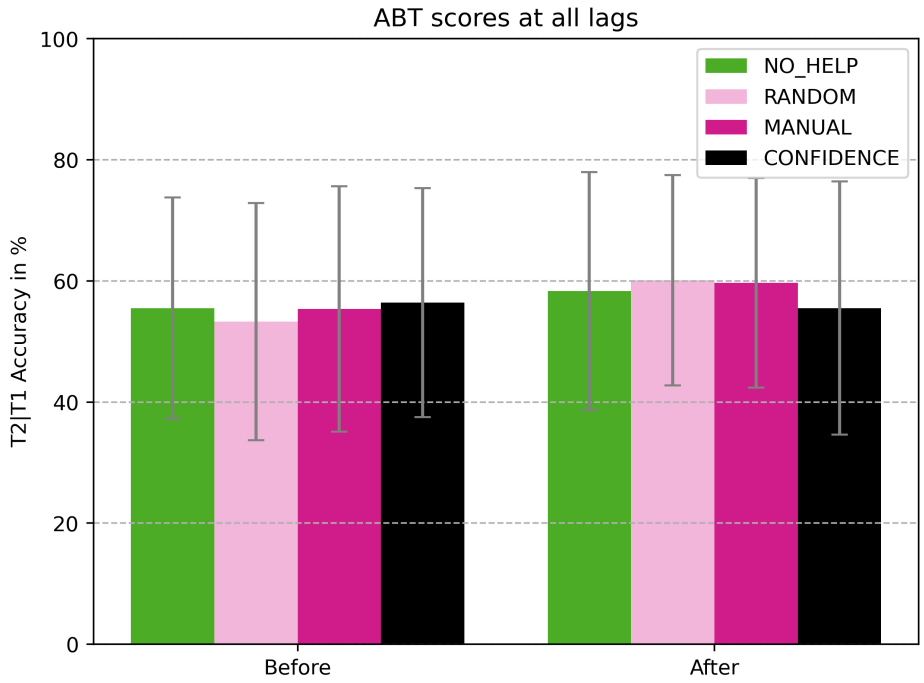


FIGURE 4.15 – *Scores d'attention avant et après l'expérience pour chacun des 4 groupes. La visualisation inclus ici tous les décalages mélangés. Contrairement à la figure 4.14, il n'y a ici aucune différence significative entre les performances des groupes (ni avant, ni après).*

a pas d'effet significatif pour les interactions Temps-Groupes, Décalage-Groupes ou Temps-Décalage-Groupes. Cela suggère que cette amélioration de l'état cognitif est uniquement due à l'environnement RV et à la tâche de clustering et non à la couche du système d'aide (voir la figure 4.15 pour confirmation).

L'ANOVA a également montré un effet significatif *faible* pour les Groupes ($F = 2{,}52$ et $p = 0{,}057\,4$). Cependant, nous ne pouvons pas expliquer pourquoi cet effet *faible* se produit. Ce résultat est surprenant car s'il y avait un effet pour les Groupes, il serait visible dans la figure 4.16. Cependant, les figures 4.15 et 4.16 nous montrent que les groupes seuls semblent n'avoir pratiquement aucun effet, et que les interactions entre les groupes et le décalage ou les groupes et le temps semblent non significatives. Nous avons essayé d'effectuer des analyses complémentaires pour valider cet effet significatif du groupe, mais nous n'avons trouvé que des différences non significatives. Pour la discussion, nous n'inclurons pas ce résultat car il est invalidé par les tests statistiques complémentaires et les figures 4.15 et 4.16.

eXpérience Utilisateur

Lors de l'étude de l'expérience utilisateur, toutes les analyses ont été effectuées dans un cadre multivarié.

Il n'y a pas eu de différences significatives dans la catégorie eXpérience Utilisateur entre les groupes. Cela suggère qu'aucune des aides fournies dans les groupes aidés n'a modifié l'expérience de l'utilisateur par rapport au groupe SANS AIDE. Les aides, quelque soit leur moment de déclenchement ou le degré de contrôle disponible pour

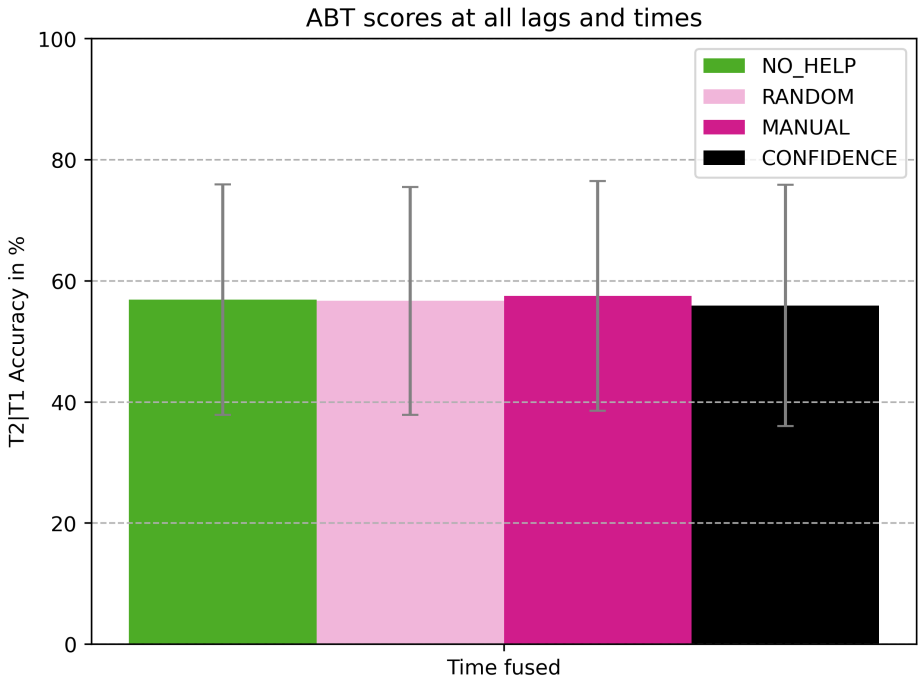


FIGURE 4.16 – *Scores d'attention pour chacun des 4 groupes. La visualisation inclus ici tous les décalages et tous les temps mélangés.*

l'utilisateur, n'ont ni amélioré ni perturbé l'immersion, le sentiment de présence, le flow ou toute autre composante de l'expérience de l'utilisateur. Nos systèmes d'aide n'ont ni affecté ni amélioré l'expérience de l'utilisateur.

4.5 Discussion

Dans cette section, nous présentons et discutons nos conclusions concernant nos systèmes de RV adaptatifs task-blind. En résumé, notre étude 1) plonge les utilisateurs dans un environnement virtuel pour effectuer une tâche de clustering, 2) est conçue pour évaluer la performance et le comportement de l'utilisateur pendant le processus de réflexion, et 3) fournit des aides visuelles task-blind, conçues pour aider les utilisateurs à comprendre leurs propres comportements. Pour pouvoir conclure concernant notre facteur indépendant (chaque système d'aide SANS AIDE, ALÉATOIRE, MANUEL et CONFIANCE), nous allons d'abord vérifier la validité de nos hypothèses concernant l'efficacité de nos systèmes d'aide (H1), la contribution à cette efficacité des composants de conception de nos systèmes d'aide (H2), et les raisons qui pourraient conduire à l'amélioration de la performance de la tâche (H3). Ensuite, nous discutons nos conclusions et présentons les limites de cette étude.

4.5.1 Vérification des hypothèses

Dans cette section, les résultats de la section 4.4 sont rassemblés pour tirer des conclusions sur les hypothèses définies dans la sous-section 4.3.1.

H.1 $\exists\ S \in\ \mathcal{S}_{Task-Blind},\ \ Performance(S)\ >\ Performance(S_\emptyset)$

Les résultats du groupe MANUEL en termes de PRÉCISION DU CLUSTERING montrent une différence significative par rapport au groupe SANS AIDE. Ces résultats suggèrent donc qu'il existe un système d'aide task-blind améliorant l'une des composantes de la performance de l'utilisateur, ce qui nous permet de confirmer H1.

H.2 $\forall\ S \in\ \mathcal{S}_{Task-Blind},\ \ Performance(S) = f(UserControl_S, HelperTimings_S)$

L'évaluation de H2 implique non seulement les résultats des groupes, mais aussi leur conception (tableau 4.1). Pour le facteur *Contrôle Utilisateur*, aucun des deux systèmes d'aide passifs (ALÉATOIRE et CONFIANCE) n'a amélioré de manière significative les performances de l'utilisateur, alors que le système actif (MANUEL) a effectivement amélioré les performances. Les résultats de l'analyse du comportement pour les catégories Usage Aides et Exploration montrent que le système d'aide actif incite les utilisateurs à activer un peu moins d'aides et à explorer les espaces de travail de manière plus visuelle. Ce comportement, et le fait qu'il soit efficace en termes de performances, suggère que le contrôle de l'utilisateur sur les aides est un facteur important dans la conception de systèmes d'aide task-blind efficaces. Pour le facteur *Timing Aide*, aucun des systèmes d'aide, qu'ils soient non régulés (ALÉATOIRE) ou régulés (MANUEL et CONFIANCE), n'a obtenu de meilleurs résultats que SANS AIDE. Les résultats de l'analyse du comportement pour les catégories Usage Aides et Exploration montrent que les systèmes d'aide régulés ont utilisé deux types d'aides (PROGRESSION D'INTERACTION et SURBRILLANCE) plus longtemps que les deux autres, alors que le système d'aide non régulé a utilisé les quatre types d'aides de manière égale. Quelle que soit la conception pour le facteur *Timing Aide*, aucune stratégie spécifique ne semble se démarquer pour la catégorie Exploration. Dans l'ensemble, cela suggère que nous ne pouvons pas tirer de conclusions sur l'importance du facteur *Timing Aide* dans la conception d'un système d'aide task-blind.

En conclusion, H2 est partiellement validé, avec des résultats prometteurs pour la conception de systèmes d'aide actifs. Cela ouvre des perspectives intéressantes concernant les options de contrôle à fournir aux utilisateurs que nous verrons dans les perspectives de la thèse (sous-section 5.2.1).

H.3 $\forall S \in \mathcal{S}_{Task-Blind}$ tel que $Performance(S)\ >\ Performance(S_\emptyset),\ \ ECS(S) \nearrow \implies Performance(S) \nearrow$

L'évaluation de la validité de H3 est basée sur les résultats de la catégorie Cognition. Nous avons constaté que les facteurs Décalage, Temps et l'interaction Décalage-Temps avaient un effet significatif, ce qui correspond aux résultats déjà observés dans la littérature. L'effet de Attentional Blink s'est correctement pro-

duit (Raymond et al., 1992 ; Shapiro et al., 1997), et les scores ont été améliorés pour tous les petits décalages après l'expérience, ce qui suggère qu'un ECS a bien eu lieu (Kozhevnikov et al., 2018). Cependant, il n'y avait pas d'effet clair pour le facteur Groupes, et les interactions Groupes-Temps, Groupes-Décalage et Groupes-Temps-Décalage. Nous pouvons donc conclure que les ECS ne sont pas le résultat de nos variations du système d'aide. L'application de base pour le clustering en RV, qui a été utilisée sans aucune aide supplémentaire par le groupe sans aide, était seule responsable de l'existence de ces ECS. Notre hypothèse selon laquelle notre système d'aide task-blind peut produire un état cognitif augmenté, entraînant une amélioration des performances, n'est donc pas validée dans cette étude. Ce résultat reste néanmoins intéressant et sera discuté plus en détail dans la sous-section 4.5.2.

4.5.2 Points de suivi

Nos résultats montrent le potentiel des systèmes d'aide task-blind et la manière dont nous pouvons les concevoir et les évaluer. Les systèmes d'aide task-blind peuvent améliorer de manière significative les performances des utilisateurs sur une tâche que le système ne connaît pas.

Pour comprendre cet effet, nous avons testé différents facteurs impliqués dans la conception des systèmes d'aide. Il semble que le fait de donner à l'utilisateur un contrôle actif sur les aides visuelles soit un élément clef de l'efficacité des systèmes d'aide task-blind. Pour comprendre pourquoi, nous avons essayé de voir s'il y avait un lien avec les ECS. Même si notre système d'analyse immersif était suffisamment engageant pour induire des ECS, il semble que nos systèmes d'aide task-blind n'aient pas spécifiquement induit d'ECS. Cela ouvre la voie à des perspectives intéressantes, car cela signifie qu'il existe au moins une cause autre (encore inconnue et qui n'est pas l'apparition d'ECS) qui explique pourquoi les systèmes d'aide task-blind ont un impact sur les performances.

Nous notons que le cas d'application de notre expérience, la tâche de clustering en Immersive Analytics, a été jugée complexe par les utilisateurs. Les participants ont parfois indiqué qu'ils ne se sentaient pas en contrôle en raison d'un manque d'expérience (avec les dispositifs de RV ou avec les tâches de clustering par exemple). Nous avons essayé de reproduire une situation en conditions réelles dans laquelle les utilisateurs peuvent explorer un environnement inconnu, manquer d'expérience dans le domaine et trouver la tâche difficile, voire les trois à la fois. Même dans une telle situation, nous avons réussi à construire un système d'aide qui ne connaît pas la tâche, qui n'affecte pas négativement, ni l'immersion, ni l'expérience de l'utilisateur, et qui améliore néanmoins les performances de l'utilisateur.

4.5.3 Limitations

Notre premier point pour cette deuxième étude concerne la conception de nos systèmes d'aide. Nous avons remarqué que le groupe aléatoire se situait parfaitement entre les groupes sans aide et manuel dans presque tous les résultats, ce qui suggère

que fournir de bonnes aides, même de manière aléatoire, peut légèrement influencer les performances. Cependant, le résultat étonnant (non statistiquement significatif mais très proche du seuil *faible*) que nous avons trouvé pour l'EXACTITUDE DU CLUSTERING entre les groupes CONFIANCE et MANUEL, couplé avec les graphiques de performance (voir la catégorie Performance dans la section 4.4) nous suggèrent que CONFIANCE a réalisé de moins bonnes performances que ALÉATOIRE. Nous pensons qu'il est important de mentionner qu'en fonction de la conception du système d'aide task-blind, certains systèmes d'aide régulés peuvent être moins performants qu'un système d'aide non régulé.

Même si notre système MANUEL améliore les performances, notre principale limitation est que les résultats ne montrent pas d'amélioration dans toutes les composantes de la performance (voir la première hypothèse en sous-section 4.3.1). Cependant, nos deux autres hypothèses réduisent l'impact de cette limitation en aidant à la caractérisation des éléments de conception qui peuvent aider à l'amélioration des performances.

4.6 Conclusion

Nous avons présenté ici une seconde façon de concevoir des systèmes de RV adaptatifs, qui fournit une assistance pour une tâche complexe tout en utilisant une approche task-blind. Cette expérience se distingue de la première par les processus cognitifs que les systèmes d'aide visent à améliorer, et par les caractéristiques des systèmes d'aide task-blind qu'elle explore. L'objectif principal de ces travaux était d'examiner la capacité d'un système task-blind à effectivement améliorer les performances sur une tâche, tout en essayant de comprendre les raisons de cette amélioration.

Au cours d'une étude menée auprès de 56 participants, nous avons comparé différentes variantes de systèmes d'aide afin de tirer des conclusions sur les caractéristiques de conception liées à l'amélioration des performances. Nos résultats montrent que 1) les systèmes d'aide task-blind peuvent effectivement améliorer les performances et 2) les systèmes dans lesquels l'utilisateur interagit activement avec le système d'aide sont plus susceptibles d'être efficaces. Un lien, direct ou indirect et différent de l'apparition d'ECS, reste à découvrir entre les systèmes d'aide task-blind et l'amélioration des performances.

Nous aborderons en détail dans la section 5.2 les perspectives que ces résultats suggèrent. Grâce à ce travail, nous pouvons donc répondre par l'affirmative à notre question posée en début de chapitre, « *comment un système de RV adaptative task-blind peut-il aller au-delà de la modification des comportements pour améliorer effectivement les performances ?* ». Une conséquence assez directe de ces recherches est de permettre aux concepteurs d'applications en RV, une liberté de conception accrue. En effet, cela ouvre des possibilités d'adaptation ayant une influence significative, aussi bien sur les comportements que sur les performances, dans des situations pour lesquelles les tâches spécifiques que les utilisateurs effectueront sont inconnues.

Bien que ces trois chapitres présentent un point de vue alternatif prometteur sur la conception de systèmes adaptatifs en RV, il reste encore de nombreuses pistes à

explorer concernant la conception des systèmes d'aide task-blind. Le chapitre suivant conclut cette thèse avec l'ensemble des perspectives à poursuivre lors de futurs travaux.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Sommaire

5.1 Résumé des contributions 106

5.2 Perspectives 108

5.2.1 Les systèmes d'aide task-blind 108

5.2.2 Notre classification et notre modèle 109

5.2.3 L'éthique des systèmes adaptatifs en RV 110

Dans ce chapitre, nous passons en revue l'ensemble des contributions des travaux de cette thèse. Nous en tirons ensuite des perspectives intéressantes pour de futurs travaux dans le domaine de la RV adaptative, et plus particulièrement dans celui de la RV adaptative task-blind.

5.1 Résumé des contributions

Dans cette section, nous résumons les contributions et mettons en avant les apports des travaux présentés dans les chapitres précédents. Cette thèse propose trois contributions principales :

1. Une classification des systèmes adaptatifs en RV, accompagné d'un framework de conception.
2. Une étude utilisateur qui compare approche task-blind et task-aware pour étudier la faisabilité des systèmes d'aides task-blind.
3. Une étude utilisateur qui étudie les caractéristiques de conception des systèmes d'aides task-blind dans un cas d'usage complexe.

Espace de classification et modèle de RV adaptative

Dans le chapitre 2, nous avons présenté une lecture de la littérature centrée sur l'adaptation dans les domaines de la RV, de l'IHM et des sciences cognitives. Cela nous a permis de mettre en évidence que :

- la définition de la RV adaptative a beaucoup évolué et s'étend à travers plusieurs domaines. Cependant, la littérature s'accorde sur le fait que les composants adaptatifs nécessitent différentes connaissances a priori pour s'adapter à l'humain, notamment sur l'humain lui-même, sa tâche et le contexte.
- les processus cognitifs jouent le rôle du système adaptatif chez l'humain et peuvent être fortement influencés par les systèmes en RV, principalement par le biais de la vision.
- la connaissance des tâches de l'utilisateur par le système est largement mise en avant parmi les connaissances a priori nécessaires à son adaptation.

Ensuite (dans la section 2.5), nous avons proposé un nouvel angle de vue sur cet état de l'art en présentant une classification des travaux réalisés en RV adaptative selon trois axes : USER DOMINANCE, TASK AWARENESS, HELP LEVEL. Cette classification nous a permis de mettre en avant une nouvelle approche de conception de ces systèmes et de proposer une redéfinition des systèmes adaptatifs en RV, structurée autour d'un modèle conceptuel. Ce modèle, illustré dans la figure 2.5, permet :

1. de s'affranchir de la connaissances de tâches via une description des entrées du système adaptatif plus générale ;
2. de fournir une aide à la conception de systèmes adaptatifs. En effet, à travers les huit questions proposées en sous-section 2.7.1, organisées selon les trois axes de

notre classification et les trois caractéristiques majeures des AIM, nous proposons un cadre méthodologique permettant de guider la conception et l'implémentation de tout type de système adaptatif en RV.

« Ranpo Virtual Environment »

Dans le chapitre 3, nous avons présenté une étude introduisant une instanciation d'un nouveau type de système adaptatif, dit task-blind, conçu à partir de notre modèle de RV adaptative. Ce système a été conçu pour analyser le comportement humain et proposer des aides visuelles afin d'améliorer l'attention et la mémorisation des utilisateurs. L'objectif était d'éliminer la nécessité d'une connaissance explicite des objectifs des utilisateurs ainsi que d'évaluer l'impact d'un tel système sur le comportement et les performances d'un utilisateur.

Cette étude, menée auprès de 66 participants et appliquée dans un contexte de compréhension de scène de crime, compare l'approche habituelle task-aware à notre approche task-blind. Nos résultats montrent que ces deux approches induisent des comportements significativement différents : la task-aware favorise l'aide aux points d'intérêt principaux tandis que la task-blind favorise l'exploration des points d'intérêt secondaires. Cette différence permet :

1. de démontrer qu'il est possible de concevoir un système d'aide task-blind qui, au minimum, n'affecte pas négativement les performances ;
2. de démontrer qu'un tel système d'aide peut induire de nouveaux comportements ;
3. de fournir aux concepteurs de systèmes d'aide une plus grande liberté, en soulignant l'existence de systèmes qui ne nécessitent pas de données spécifiques en amont et qui offrent à l'utilisateur de nouvelles perspectives d'exploration, sans altérer ses performances sur la tâche donnée.

« Assisted Immersive Analytics »

Dans le chapitre 4, nous avons présenté une seconde étude complémentaire à la première. Nous avons implémenté trois systèmes d'aide task-blind, tous basés sur notre modèle de RV adaptative, afin d'analyser plus précisément les caractéristiques de conception ayant un impact sur leur efficacité. Ces systèmes ont été conçus de façon à prendre en compte le comportement humain et proposer ainsi des aides visuelles permettant d'améliorer la métacognition des utilisateurs. L'objectif principal était d'évaluer dans quelle mesure un système d'aide task-blind peut significativement améliorer la performance des utilisateurs dans leur tâche (toujours sans connaissance explicite sur celle-ci). L'objectif secondaire était de comprendre les mécanismes sous-jacents à cette amélioration en : 1) analysant l'impact de deux composantes de conception (le *Contrôle Utilisateur* et le *Timing Aide*) sur l'efficacité du système ; 2) évaluant l'influence de nos systèmes d'aide sur l'état cognitif des utilisateurs.

Cette étude, menée auprès de 56 participants et appliquée dans un contexte d'Immersive Analytics, compare nos trois systèmes d'aide task-blind lors d'une tâche de clustering. Nos résultats montrent que :

1. les systèmes d'aide task-blind peuvent effectivement améliorer les performances ;
2. le composant de conception *Contrôle Utilisateur* semble avoir un rôle dans l'efficacité du système, notamment en permettant d'améliorer les performances lorsque l'utilisateur a un certain degré de contrôle sur l'activation des aides ;
3. nous ne pouvons pour l'instant pas conclure sur la capacité d'un système d'aide task-blind à engendrer un ECS (« Enhanced Cognitive State »), ce qui indique qu'un autre lien, direct ou indirect, demeure à identifier entre les systèmes d'aide task-blind et l'amélioration des performances.

5.2 Perspectives

Dans cette section, nous présentons les perspectives apportées par nos travaux selon trois axes : les systèmes d'aide task-blind et leurs conceptions en sous-section 5.2.1 ; les systèmes d'adaptations en RV et leurs caractéristiques sous-exploitées en sous-section 5.2.2 ; les considérations éthiques de la RV adaptative en sous-section 5.2.3.

5.2.1 Les systèmes d'aide task-blind

L'ensemble des résultats et des limitations mis en avant par nos deux études sur les systèmes d'aide task-blind nous permettent d'évoquer plusieurs perspectives de recherches concernant cette nouvelle branche de la RV adaptative.

Premièrement, nous souhaitons rappeler qu'au sein de chacune de nos deux études, les aides visuelles présentées aux utilisateurs étaient les mêmes, quelque soit les groupes (groupes sans aides exclus). Cette particularité nous permet de réduire l'impact de la variabilité des aides sur nos résultats, et nous assure que les résultats obtenus ne sont dûs qu'à la variabilité des moments de déclenchements des aides. Ce choix, purement volontaire, nous a permis d'étudier précisément la notion de task-blind, via une comparaison avec une approche task-aware et via ses critères de conception, en utilisant des représentations usuelles du domaine et en mettant de côté les questions purement graphiques. Le critère de déclenchement des AIM (« Adaptive Interactive Mechanisms ») d'un système d'aide task-blind est donc une composante qui a un impact non négligeable sur les comportements et les performances des utilisateurs. Cependant, comme le suggère le comportement intriguant de notre groupe ALÉATOIRE décrit en sous-section 4.5.3 de notre étude « Assisted Immersive Analytics », de futurs travaux sur ces critères de déclenchement restent encore à mener. Par ailleurs, une perspective intéressante serait d'étudier l'impact des deux autres composantes d'un AIM, *i.e.* son objectif et son intégration dans l'environnement virtuel (voir la figure 2.5 pour un rappel sur les composantes des AIM). Plusieurs questions de recherche naissent de cette perspective d'analyse plus poussée de l'impact des systèmes d'aide task-blind sur la performance et le comportement des utilisateurs : *Quels impacts sur la performance et le comportement des utilisateurs auraient des systèmes d'aide task-blind dont les déclenchements et les objectifs des AIM sont similaires, mais dont les intégrations dans l'environnement sont différents ? Quels types de modifications engendrées par les AIM (esthétiques, représentation de soi, physique, comportements d'objets et d'agents) ont le plus d'impact sur la performance*

des utilisateurs ?

Deuxièmement, une autre perspective se dégage directement des travaux effectués lors de notre deuxième expérience (chapitre 4). Un des résultats direct de cette étude est que le degré de contrôle accordé à l'utilisateur a l'air d'avoir une influence sur la performance du système d'aide task-blind. Dans ce cadre, il serait utile d'étudier plus en profondeur cette hypothèse. Par exemple, il pourrait être intéressant de donner aux utilisateurs un contrôle partiel ou total (en termes d'activation des aides, de types d'aides utilisées ou de configurations spécifiques des aides), et d'étudier plus précisément l'impact que ces choix ont sur les performances ou les comportements dans un contexte task-blind. Par ailleurs, il serait intéressant de voir si d'autres caractéristiques de conception auraient un impact sur des systèmes d'aide task-blind.

Troisièmement, une dernière perspective se dégage de nos deux études. Chacune de ces expériences a présenté un objectif d'adaptation basé sur de l'augmentation cognitive (voir la sous-section 2.3.3 pour l'augmentation et la sous-section 2.3.4 pour les approches dites de super-pouvoir). Même si concernant notre hypothèse H3 (*i.e.* pourquoi un système d'aide task-blind peut améliorer les performances), chapitre 4, les résultats ne nous ont pas permis de conclure concernant le lien qui pourrait exister entre un système d'aide task-blind et l'apparition d'un ECS, le lien entre l'efficacité du système et la cognition de l'utilisateur reste à étudier plus amplement. En effet, dans nos expériences, toutes les aides ont été conçues comme des indices visuels pour améliorer soit la métacognition, soit l'attention et la mémorisation de l'utilisateur. Une opportunité serait d'explorer des aides basées sur d'autres comportements cognitifs comme, par exemple, la confiance, la mémoire, les processus liés à la pensée, etc. Nous vous invitons à voir les travaux de Pohl (2022) pour une liste de comportements cognitifs intéressants qui pourraient être considérés. De la même manière que nous avons eu des résultats différents entre nos deux études, qui visaient chacune des processus cognitifs différents, étudier de tels systèmes permettrait d'avoir une meilleure compréhension de l'impact du processus cognitif choisi sur l'efficacité du système d'aide task-blind.

Ces trois perspectives concernant les systèmes d'aide task-blind ouvrent la voie à beaucoup d'expériences possibles, qui impliqueront systématiquement la conception et l'implémentation d'un système d'aide task-blind et de sa logique. Pour cela, les concepteurs pourront s'appuyer sur notre modèle et notre classification (voir la sous-section 2.7.1), qui ouvrent eux aussi des perspectives que nous détaillons ensuite.

5.2.2 Notre classification et notre modèle

Une des perspectives principales ouverte par notre lecture de la littérature est la mise en avant de catégories de RV adaptative peu considérées. Par exemple les systèmes d'aide task-blind, qui sont particulièrement étudiés dans cette thèse et dont les perspectives sont présentées dans la section précédente. Un autre exemple est la catégorie des DISTURBING SYSTEM. Elle contient principalement des systèmes qui perturbent la perception afin de générer des illusions, ou qui, d'une manière ou d'une autre, perturbent l'expérience en augmentant la difficulté (et très peu de ces systèmes intègrent une approche task-blind). En revanche, elle ne contient que très peu d'articles

dont les systèmes adaptatifs présentés ont clairement pour objectif d'être une source de perturbation de l'expérience utilisateur. Comme le montrent les travaux de design fiction de TSENG et al. (2022) et BONNAIL et al. (2023), il serait pourtant intéressant d'étudier ce genre de systèmes afin de mettre en place des mécanismes pour s'en prévenir dans les usages grand publics (voir notre perspective suivante en sous-section 5.2.3 pour des détails sur les questionnements éthiques). Nous espérons que mettre en avant ce genre de catégories permettra d'ouvrir de nouvelles recherches sur ces sujets.

La dernière perspective a évoquer dans cette section concerne notre modèle et les questions de conception qui y sont associés. Nous avons remarqué que quelques travaux utilisent des algorithmes d'apprentissage machine pour des aspects très spécifiques de l'interaction (ALGHOFAILI et al., 2019 ; KUPIN et al., 2019 ; NARKAR et al., 2024 ; F.-C. YANG et al., 2024). Notre modèle, en segmentant les composants caractéristiques de l'adaptation et en fournissant des questions de conception à chaque étape, ouvre la voie à de l'optimisation partielle des systèmes adaptatifs. En effet, il nous semble pertinent d'imaginer l'usage d'algorithmes d'apprentissage machine pour certains aspects spécifiques de l'adaptation, comme le critère de déclenchement dans les systèmes passifs sur l'axe USER DOMINANCE ou l'intégration de l'adaptation dans l'environnement virtuel. De même, certaines questions (par exemple Q.T-User, Q.I-Task, et Q.I-Help) sont propices à l'utilisation de ces algorithmes dans leurs implémentations.

5.2.3 L'éthique des systèmes adaptatifs en RV

Un dernier point nous semble important à évoquer concernant les perspectives : les questions éthiques liées aux systèmes adaptatifs en RV. Bien que les deux expériences de cette thèse aient fait l'objet d'une étude au préalable et d'une validation par le comité d'éthique de l'Université de Montpellier, nous n'avons pas directement adressé ces questionnements. La question de l'éthique concernant l'impact direct (cybercinétose, surcharge cognitive, expérience utilisateur ou retour à la réalité) d'une telle technologie sur l'humain est assez bien structuré dans la littérature et depuis longtemps (BEHR et al., 2005). Cependant, l'éthique liée à l'adaptation en RV en elle-même ou ses conséquences (sociales, sur la vie privée..)dont les questionnements ont été soulevés récemment (AL-KFAIRY et al., 2024 ; MADARY & METZINGER, 2016), mériterait d'être étudiée plus précisément.

Comme nous l'avons évoqué rapidement dans la sous-section 2.3.2 sur les illusions, BONNAIL et al. (2023) et TSENG et al. (2022) ont étudié les conséquences négatives que peuvent avoir les manipulations en RV sur les utilisateurs. Que ça soit via des manipulations sur la mémoire, ou l'incitation à réaliser des actions initialement non voulues (atteinte physique ou cognitive sur l'utilisateur ou les gens autour), ces travaux mettent en avant les dérives qui peuvent résulter, de manière volontaire ou non, d'une immersion dans un environnement virtuel. Lorsque nous faisons le parallèle avec notre classification, nous voyons que ces situations sont surtout présentes dans des contextes d'adaptation où l'utilisateur n'a pas de contrôle sur les systèmes adaptatifs (parfois il n'a même pas conscience de l'existence de l'adaptation) et où ces systèmes sont plutôt dans la catégorie DISTURBING SYSTEM. Nous souhaitons mettre en avant que notre classification, ainsi que les questions de conceptions associées, peuvent ainsi être

utilisées comme outils de prévention simple, pour la détection de systèmes malveillants.

Nous pensons également que les risques sont parfois présents dans les autres catégories d'adaptations en RV. Par exemple, les travaux de Kupin et al. (2019) et Miller et al. (2022) consistent à faire de la reconnaissance d'individus. Leur système adaptatif déclenche une identification de l'utilisateur basée sur l'analyse d'une gestuelle : attraper une balle et la lancer. Cette gestuelle est simple, elle est réalisée naturellement au cours de beaucoup d'applications en RV, et elle sert ici à différencier de façon unique un utilisateur (menant potentiellement à d'autres adaptations pour cet utilisateur spécifique). Ces travaux ne soulèvent pas de questions éthiques directes et ne se placent pas dans la catégorie DISTURBING SYSTEM de notre classification car l'adaptation est ici indétectable pour l'utilisateur et son expérience n'est pas perturbée. Cependant, ce genre de système peut rapidement être vu comme une menace d'un point de vue de la gestion des données personnelles et peut amener à des dérives de recommandations, surtout dans des contextes de réseaux sociaux, d'utilisations à grandes échelles ou d'applications ouvrant la possibilité à des transactions financières.

La place des algorithmes d'apprentissage machine est aussi une question intéressante à traiter, surtout dans le contexte politique actuel, où la loi européenne sur l'intelligence artificielle du 13 juin 2024[1] catégorise comme critiques et interdit les formes d'intelligence artificielle subliminales ou induisant des techniques de manipulation, et les formes de catégorisations biométriques. Comme nous l'avons vu dans cette thèse, l'adaptation en RV est de plus en plus liée à l'activité cognitive et comportementale de l'individu. Les risques sous-jacents à la récolte de données biométriques doivent être considérées et ouvrent des perspectives de travaux intéressants, mais surtout nécessaires, concernant l'éthique et les choix de société liés à ces questionnements.

Pour en revenir à la métaphore proposée en introduction, nous pensons qu'il est intéressant d'aider l'utilisateur à égaler les capacités de Sherlock Holmes, tout en garantissant le respect de sa vie privée et la transparence des objectifs du système adaptatif.

1. Lien de référence de la loi : https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj?locale=fr, Date de dernière consultation le : 12/02/2025

GLOSSAIRE

AIM *Adaptive Interactive Mechanisms* : mécanismes interactifs adaptatifs conçus pour promouvoir un comportement et/ou des expériences spécifiques au sein d'une boucle de rétroaction en RV. 12, 28, 43

ECS *Enhanced Cognitive States* : états cognitifs améliorés résultants d'une augmentation cognitive, *i.e.* de l'adaptation du système aux besoins de l'humain après détection de son état cognitif. 21, 43, 84, 101

IHM *Interaction humain-machine* : domaine consacré à l'étude, la conception et l'évaluation des systèmes informatiques interactifs. 9, 25

Immersive Analytics Science du raisonnement analytique assisté par ordinateur, facilité par des interfaces humain-machine immersives. 25, 31, 72

IVEQ *Immersive Virtual Experience Questionnaire* : questionnaire d'expérience virtuelle conçu par Tcha-Tokey (2018) pour recueillir leurs ressentis concernant l'utilisabilité et l'expérience utilisateur. 56, 84, II

RV *Réalité Virtuelle* : domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec une personne en immersion pseudo-naturelle. 9, 28, 46, 73

RV adaptative Système de RV intégrant une surveillance de l'utilisateur et des formes d'adaptation au sein d'une boucle de rétroaction fermée en temps réel. 24, 28, 43, 66, 73, 102

SGD *Subtle Gaze Direction* : méthode utilisant le suivi oculaire ainsi que des modifications visuelles mineures pour diriger le regard de l'utilisateur à l'intérieur d'une scène. 17, 58

système d'aide Système de RV adaptative générant des feedback afin de soutenir l'objectif, la tâche ou l'action actuelle de l'utilisateur. 30, 46, 53, 72, 99

task-blind Système de RV adaptative n'utilisant aucune connaissance, a priori ou déduite en temps réel, des tâches de l'utilisateur. 31, 46, 66, 72, 99

BIBLIOGRAPHIE

Abowd, G. D., Dey, A. K., Brown, P. J., Davies, N., Smith, M., & Steggles, P. (1999). Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness. In G. Goos, J. Hartmanis, J. Van Leeuwen & H.-W. Gellersen (Éd.), *Handheld and Ubiquitous Computing* (p. 304-307, T. 1707). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-48157-5_29 (cf. pages 14, 15).

Ai, X., Wu, Z., Guo, T., Zhong, J., Hu, N., & Fu, C. (2021). The effect of visual attention on stereoscopic lighting of museum ceramic exhibits: A virtual environment mixed with eye-tracking. *Informatica*, *45*(5) (cf. page 17).

Alghofaili, R., Sawahata, Y., Huang, H., Wang, H.-C., Shiratori, T., & Yu, L.-F. (2019). Lost in style: gaze-driven adaptive aid for VR navigation. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-12. https://doi.org/10.1145/3290605.3300578 (cf. pages 13, 35, 110).

Al-Kfairy, M., Alrabaee, S., & Alfandi, O. (2024). Ethical Pathways in VR and the Metaverse : Frameworks for Responsible Innovation. *2024 2nd International Conference on Intelligent Metaverse Technologies & Applications* (*iMETA*), 009-017. https://doi.org/10.1109/iMETA62882.2024.10807903 (cf. page 110).

Austin, C. R., Ens, B., Satriadi, K. A., & Jenny, B. (2020). Elicitation study investigating hand and foot gesture interaction for immersive maps in augmented reality. *Cartography and Geographic Information Science*, *47*(3), 214-228. https://doi.org/10.1080/15230406.2019.1696232 (cf. page 26).

Azmandian, M., Hancock, M., Benko, H., Ofek, E., & Wilson, A. D. (2016). Haptic Retargeting : Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1968-1979. https://doi.org/10.1145/2858036.2858226 (cf. pages 20, 35).

Babaei, E., Tag, B., Dingler, T., & Velloso, E. (2021). A critique of electrodermal activity practices at CHI. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-14. https://doi.org/10.1145/3411764.3445370 (cf. pages 47, 73).

Bai, X., White, D., & Sundaram, D. (2012). Contextual adaptive knowledge visualization environments. *Electronic Journal of Knowledge Management*, *10*(1), pp1-14-pp1-14 (cf. pages 12, 14).

Bailey, R., McNamara, A., Sudarsanam, N., & Grimm, C. (2009). Subtle gaze direction. *ACM Transactions on Graphics*, *28*(4), 1-14. https://doi.org/10.1145/1559755.1559757 (cf. pages 17, 49, 58).

Baker, C., & Fairclough, S. H. (2022, janvier). Chapter 9 - Adaptive virtual reality. In S. H. Fairclough & T. O. Zander (Éd.), *Current Research in Neuroadaptive*

Technology (p. 159-176). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821413-8.00014-2 (cf. pages 10-13, 35, 39, 41).

Barathi, S. C., Proulx, M., O'Neill, E., & Lutteroth, C. (2020). Affect recognition using psychophysiological correlates in high intensity VR exergaming. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-15. https://doi.org/10.1145/3313831.3376596 (cf. page 19).

Barrett, L. F. (2017, mars). *How emotions are made: the secret life of the brain* (Pan Macmillan). Houghton Mifflin Harcourt. (cf. page 19).

Batch, A., Cunningham, A., Cordeil, M., Elmqvist, N., Dwyer, T., Thomas, B. H., & Marriott, K. (2020). There Is No Spoon : Evaluating Performance, Space Use, and Presence with Expert Domain Users in Immersive Analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *26*(1), 536-546. https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2934803 (cf. page 26).

Behr, K.-M., Nosper, A., Klimmt, C., & Hartmann, T. (2005). Some Practical Considerations of Ethical Issues in VR Research. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, *14*(6), 668-676. https://doi.org/10.1162/105474605775196535 (cf. page 110).

Benedek, M., Stoiser, R., Walcher, S., & Körner, C. (2017). Eye Behavior Associated with Internally versus Externally Directed Cognition. *Frontiers in Psychology*, *8* (cf. page 17).

Besga, S., Rodriguez, N., Sallaberry, A., Papastergiou, T., & Poncelet, P. (2025). Task-blind adaptive virtual reality: Is it possible to help users without knowing their assignments? *Virtual Reality*, *29*(1), 35. https://doi.org/10.1007/s10055-025-01100-9 (cf. pages 4, 47).

Bian, Y., Yang, C., Gao, F., Li, H., Zhou, S., Li, H., Sun, X., & Meng, X. (2016). A framework for physiological indicators of flow in VR games: construction and preliminary evaluation. *Personal and Ubiquitous Computing*, *20*(5), 821-832. https://doi.org/10.1007/s00779-016-0953-5 (cf. pages 19, 22, 31, 32).

Bian, Y., Zhou, C., Chen, Y., Zhao, Y., Liu, J., & Yang, C. (2020). The Role of the Field Dependence-independence Construct on the Flow-performance Link in Virtual Reality. *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 1-9. https://doi.org/10.1145/3384382.3384529 (cf. pages 22, 35).

Bian, Y., Zhou, C., Gai, W., Liu, J., & Yang, C. (2023). The effect of embodied interaction designs on flow experience: examination in VR games. *Virtual Reality*, *27*(2), 1549-1565. https://doi.org/10.1007/s10055-023-00758-3 (cf. page 22).

Boger, T., Most, S. B., & Franconeri, S. L. (2021). Jurassic Mark: Inattentional Blindness for a Datasaurus Reveals that Visualizations are Explored, not Seen. *arXiv:2108.05182 [cs]* (cf. page 24).

Bonnail, E., Tseng, W.-J., Mcgill, M., Lecolinet, E., Huron, S., & Gugenheimer, J. (2023). Memory Manipulations in Extended Reality. *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-20. https://doi.org/10.1145/3544548.3580988 (cf. pages 17, 20, 29, 110).

Bowman, D., Kruijff, E., LaViola Jr, J. J., & Poupyrev, I. P. (2004). *3D User Interfaces : Theory and Practice*. Addison-Wesley. (cf. pages 49, 78).

Bowman, D. A., & Hodges, L. F. (1999). Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments.

Journal of Visual Languages & Computing, *10*(1), 37-53. https://doi.org/10.1006/jvlc.1998.0111 (cf. pages 49, 78).

Bowman, D. A., North, C., Chen, J., Polys, N. F., Pyla, P. S., & Yilmaz, U. (2003). Information-Rich Virtual Environments : Theory, Tools, and Research Agenda. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 81-90. https://doi.org/10.1145/1008653.1008669 (cf. pages 10, 12).

Bressa, N., Korsgaard, H., Tabard, A., Houben, S., & Vermeulen, J. (2021). What's the Situation with Situated Visualization? A Survey and Perspectives on Situatedness. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1-1. https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3114835 (cf. page 24).

Card, S., Mackinlay, J., & Shneiderman, B. (1999, janvier). *Readings in Information Visualization : Using Vision To Think* (Information Visualization). Academic Press. (cf. page 19).

Chandler, T., Cordeil, M., Czauderna, T., Dwyer, T., Glowacki, J., Goncu, C., Klapperstueck, M., Klein, K., Marriott, K., Schreiber, F., & Wilson, E. (2015). Immersive Analytics. *2015 Big Data Visual Analytics (BDVA)*, 1-8. https://doi.org/10.1109/BDVA.2015.7314296 (cf. page 25).

Cheng, L.-P., Ofek, E., Holz, C., Benko, H., & Wilson, A. D. (2017). Sparse Haptic Proxy: Touch Feedback in Virtual Environments Using a General Passive Prop. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 3718-3728. https://doi.org/10.1145/3025453.3025753 (cf. pages 29, 36).

Cordeil, M., Cunningham, A., Bach, B., Hurter, C., Thomas, B. H., Marriott, K., & Dwyer, T. (2019). IATK : An Immersive Analytics Toolkit. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 200-209. https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797978 (cf. pages 26, 36).

Cordeil, M., Cunningham, A., Dwyer, T., Thomas, B. H., & Marriott, K. (2017). ImAxes : Immersive Axes as Embodied Affordances for Interactive Multivariate Data Visualisation. *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 71-83. https://doi.org/10.1145/3126594.3126613 (cf. pages 26, 36).

Cowan, N., Bao, C., Bishop-Chrzanowski, B. M., Costa, A. N., Greene, N. R., Guitard, D., Li, C., Musich, M. L., & Ünal, Z. E. (2024). The Relation Between Attention and Memory. *Annual Review of Psychology*, *75*(Volume 75, 2024), 183-214. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-040723-012736 (cf. pages 17, 46).

Csikszentmihalyi, M. (2000). *Beyond Boredom and Anxiety*. Jossey-Bass. (cf. pages 21, 32).

Danyluk, K., Ulusoy, T. T., Wei, W., & Willett, W. (2020). Touch and Beyond :Comparing Physical and Virtual Reality Visualizations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *28*(4), 1930-1940. https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3023336 (cf. pages 25, 26).

De Boeck, M., & Vaes, K. (2021). Structuring human augmentation within product design. *Proceedings of the Design Society*, *1*, 2731-2740. https://doi.org/10.1017/pds.2021.534 (cf. page 21).

De Loor, P., Manac'h, K., & Tisseau, J. (2009). Enaction-Based Artificial Intelligence: Toward Co-evolution with Humans in the Loop. *Minds and Machines*, *19*(3), 319-343. https://doi.org/10.1007/s11023-009-9165-3 (cf. page 10).

Dennemont, Y., Bouyer, G., Otmane, S., & Mallem, M. (2013). 3D Interaction Assistance in Virtual Reality: A Semantic Reasoning Engine for Context-Awareness. In P. C. Vinh, N. M. Hung, N. T. Tung & J. Suzuki (Éd.), *Context-Aware Systems and Applications* (p. 30-40, T. 109). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36642-0_4 (cf. pages 14, 36).

Dillman, K. R., Mok, T. T. H., Tang, A., Oehlberg, L., & Mitchell, A. (2018). A Visual Interaction Cue Framework from Video Game Environments for Augmented Reality. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-12. https://doi.org/10.1145/3173574.3173714 (cf. pages 9, 49, 78).

Dinh, H., Walker, N., Hodges, L., Song, C., & Kobayashi, A. (1999). Evaluating the Importance of Multi-Sensory Input on Memory and the Sense of Presence in Virtual Environments. *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, 222-228. https://doi.org/10.1109/VR.1999.756955 (cf. page 17).

Dove, E., Wang, R., Zabjek, K., & Astell, A. (2020). Impacts of Motion-Based Technology on Balance, Movement Confidence, and Cognitive Function Among People With Dementia or Mild Cognitive Impairment: Protocol for a Quasi-Experimental Pre- and Posttest Study. *JMIR Research Protocols*, *9*(9), e18209. https://doi.org/10.2196/18209 (cf. page 81).

Dux, P., & Kelly, A. (2012). Different Attentional Blink Tasks Reflect Distinct Information Processing Limitations : An Individual Differences Approach. *Journal of Vision*, *12*(9), 1329. https://doi.org/10.1167/12.9.1329 (cf. page 85).

Dwyer, T., Cordeil, M., Czauderna, T., Delir Haghighi, P., Ens, B., Goodwin, S., Jenny, B., Marriott, K., & Wybrow, M. (2020). The Data Visualisation and Immersive Analytics Research Lab at Monash University. *Visual Informatics*, *4*(4), 41-49. https://doi.org/10.1016/j.visinf.2020.11.001 (cf. page 26).

Dwyer, T., Marriott, K., Isenberg, T., Klein, K., Riche, N., Schreiber, F., Stuerzlinger, W., & Thomas, B. H. (2018). Immersive Analytics: An Introduction. In K. Marriott, F. Schreiber, T. Dwyer, K. Klein, N. H. Riche, T. Itoh, W. Stuerzlinger & B. H. Thomas (Éd.), *Immersive Analytics* (p. 1-23). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01388-2_1 (cf. page 25).

El Ali, A., Ney, R., van Berlo, Z. M. C., & Cesar, P. (2023). Is That My Heartbeat? Measuring and Understanding Modality-Dependent Cardiac Interoception in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *29*(11), 4805-4815. https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3320228 (cf. pages 16, 36).

Engström, P. (2018). Virtual Reality for Crime Scene Visualization. *Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018*, *10666*, 102-108. https://doi.org/10.1117/12.2304653 (cf. pages 18, 46).

Ens, B., Bach, B., Cordeil, M., Engelke, U., Serrano, M., Willett, W., Prouzeau, A., Anthes, C., Büschel, W., Dunne, C., Dwyer, T., Grubert, J., Haga, J. H., Kirshenbaum, N., Kobayashi, D., Lin, T., Olaosebikan, M., Pointecker, F., Saffo, D., … Yang, Y. (2021). Grand challenges in immersive analytics. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-17. https://doi.org/10.1145/3411764.3446866 (cf. page 26).

Fairclough, S. (2015). A Closed-Loop Perspective on Symbiotic Human-Computer Interaction. In B. Blankertz, G. Jacucci, L. Gamberini, A. Spagnolli & J. Freeman

(Éd.), *Symbiotic Interaction* (p. 57-67). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24917-9_6 (cf. page 10).

Fairclough, S. H. (2017, janvier). Chapter 20 - Physiological Computing and Intelligent Adaptation. In M. Jeon (Éd.), *Emotions and Affect in Human Factors and Human-Computer Interaction* (p. 539-556). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801851-4.00020-3 (cf. page 10).

Felicini, N., & Mortara, L. (2023). Augmented Cognition Compass: A Taxonomy of Cognitive Augmentations. In D. D. Schmorrow & C. M. Fidopiastis (Éd.), *Augmented Cognition* (p. 189-205). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35017-7_13 (cf. page 21).

Fischer, G. (2001). User Modeling in Human–Computer Interaction. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, *11*(1), 65-86. https://doi.org/10.1023/A:1011145532042 (cf. pages 30, 32).

Flavián, C., Ibáñez-Sánchez, S., & Orús, C. (2019). The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. *Journal of Business Research*, *100*, 547-560. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.050 (cf. page 29).

Fonnet, A., & Prie, Y. (2021). Survey of Immersive Analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *27*(3), 2101-2122. https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2929033 (cf. page 26).

Fricoteaux, L., Thouvenin, I., & Mestre, D. (2014). GULLIVER: A decision-making system based on user observation for an adaptive training in informed virtual environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *33*, 47-57. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.03.005 (cf. pages 12, 29, 36).

Fuchs, P. (2017, février). *Virtual Reality Headsets - A Theoretical and Pragmatic Approach*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315208244 (cf. pages 10, 11, 50).

Fuchs, P., Moreau, G., Coquillart, S., & Burkhardt, J.-M. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle*. Presses des MINES. (cf. page 9).

Gagnon, K. T., Thomas, B. J., Munion, A., Creem-Regehr, S. H., Cashdan, E. A., & Stefanucci, J. K. (2018). Not all those who wander are lost: Spatial exploration patterns and their relationship to gender and spatial memory. *Cognition*, *180*, 108-117. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.06.020 (cf. pages 18, 50).

Geslain, B., Besga, S., Lebrun, F., & Bailly, G. (2022). Generalizing the Hand Redirection Function in Virtual Reality. *Proceedings of the 2022 International Conference on Advanced Visual Interfaces*, 1-9. https://doi.org/10.1145/3531073.3531100 (cf. pages 20, 36).

Gil, M., Pelechano, V., Fons, J., & Albert, M. (2016). Designing the human in the loop of self-adaptive systems. In C. R. García, P. Caballero-Gil, M. Burmester & A. Quesada-Arencibia (Éd.), *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence* (p. 437-449). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48746-5_45 (cf. page 12).

Golemati, M., Halatsis, C., Vassilakis, C., Katifori, A., & Lepouras, G. (2006). A Context-Based Adaptive Visualization Environment. *Tenth International Conference on Information Visualisation (IV'06)*, 62-67. https://doi.org/10.1109/IV.2006.5 (cf. page 15).

Gonzalez, E. J., Abtahi, P., & Follmer, S. (2020). REACH+: Extending the Reachability of Encountered-type Haptics Devices through Dynamic Redirection in VR. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 236-248. https://doi.org/10.1145/3379337.3415870 (cf. pages 29, 36).

Gonzalez-Franco, M., & Lanier, J. (2017). Model of Illusions and Virtual Reality. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1125. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01125 (cf. page 20).

Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Contributions of Proprioception to Navigation in Virtual Environments. *Human Factors*, *40*(3), 489-497. https://doi.org/10.1518/001872098779591296 (cf. page 11).

Grogorick, S., Stengel, M., Eisemann, E., & Magnor, M. (2017). Subtle gaze guidance for immersive environments. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, 1-7. https://doi.org/10.1145/3119881.3119890 (cf. pages 17, 49).

Gupta, K. (2023). *CAEVR: A Conceptual Framework for Designing Context-Aware Empathic VR* [Thesis]. The University of Auckland. (cf. page 15).

Hoffman, J. E., & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, *57*(6), 787-795. https://doi.org/10.3758/BF03206794 (cf. page 17).

Hoffrage, U. (2022). Overconfidence. In *Cognitive Illusions* (3e éd., p. 20). Routledge. (cf. pages 16, 81).

Hoover, M., & Winer, E. (2021). Designing Adaptive Extended Reality Training Systems Based on Expert Instructor Behaviors. *IEEE Access*, *9*, 138160-138173. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3118105 (cf. page 31).

Hu, Y., Abe, N., Benallegue, M., Yamanobe, N., Venture, G., & Yoshida, E. (2022). Toward Active Physical Human–Robot Interaction : Quantifying the Human State During Interactions. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *52*(3), 367-378. https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3138684 (cf. page 73).

Hurtienne, J., Maas, F., Carolus, A., Reinhardt, D., Baur, C., & Wienrich, C. (2020). Move&Find : The Value of Kinaesthetic Experience in a Casual Data Representation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *40*(6), 61-75. https://doi.org/10.1109/MCG.2020.3025385 (cf. page 24).

Kloiber, S., Settgast, V., Schinko, C., Weinzerl, M., Fritz, J., Schreck, T., & Preiner, R. (2020). Immersive analysis of user motion in VR applications. *The Visual Computer*, *36*(10-12), 1937-1949. https://doi.org/10.1007/s00371-020-01942-1 (cf. pages 26, 36).

Koriat, A. (2007). Metacognition and Consciousness. In E. Thompson, M. Moscovitch & P. D. Zelazo (Éd.), *The Cambridge Handbook of Consciousness*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511816789.012 (cf. page 16).

Kozhevnikov, M. (2022). Boosting Cognitive Capabilities through Enhanced States during Gaming. *MODSIM World*, 1-11 (cf. page 22).

Kozhevnikov, M., Li, Y., Wong, S., Obana, T., & Amihai, I. (2018). Do enhanced states exist? Boosting cognitive capacities through an action video-game. *Cognition*, *173*, 93-105. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.01.006 (cf. pages 21, 22, 32, 46, 85, 97, 101).

Kraus, M., Weiler, N., Oelke, D., Kehrer, J., Keim, D. A., & Fuchs, J. (2020). The Impact of Immersion on Cluster Identification Tasks. *IEEE Transactions on Visualization*

and Computer Graphics, *26*(1), 525-535. https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2934395 (cf. page 25).

Krokos, E., Plaisant, C., & Varshney, A. (2019). Virtual memory palaces: immersion aids recall. *Virtual Reality*, *23*(1), 1-15. https://doi.org/10.1007/s10055-018-0346-3 (cf. page 17).

Kupin, A., Moeller, B., Jiang, Y., Banerjee, N. K., & Banerjee, S. (2019). Task-Driven Biometric Authentication of Users in Virtual Reality (VR) Environments. In I. Kompatsiaris, B. Huet, V. Mezaris, C. Gurrin, W.-H. Cheng & S. Vrochidis (Éd.), *MultiMedia Modeling* (p. 55-67). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05710-7_5 (cf. pages 36, 110, 111).

Lemmens, J. S., & von Münchhausen, C. F. (2023). Let the beat flow: How game difficulty in virtual reality affects flow. *Acta Psychologica*, *232*, 103812. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2022.103812 (cf. page 22).

Li, G., Anguera, J. A., Javed, S. V., Khan, M. A., Wang, G., & Gazzaley, A. (2020). Enhanced Attention Using Head-mounted Virtual Reality. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *32*(8), 1438-1454. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01560 (cf. pages 17, 22, 36).

Lin, W.-Y., Venkatakrishnan, R., Venkatakrishnan, R., Babu, S. V., Pagano, C., & Lin, W.-C. (2024). An Empirical Evaluation of the Calibration of Auditory Distance Perception under Different Levels of Virtual Environment Visibilities. *2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 690-700. https://doi.org/10.1109/VR58804.2024.00089 (cf. page 55).

Lisle, L., Davidson, K., Gitre, E. J., North, C., & Bowman, D. A. (2021). Sensemaking Strategies with Immersive Space to Think. *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 529-537. https://doi.org/10.1109/VR50410.2021.00077 (cf. page 26).

Liu, Y. (2023). The Proteus Effect: Overview, Reflection, and Recommendations. *Games and Culture*, 15554120231202175. https://doi.org/10.1177/15554120231202175 (cf. page 20).

Luck, M., & Aylett, R. (2000). Applying artificial intelligence to virtual reality: Intelligent virtual environments. *Applied Artificial Intelligence*, *14*(1), 3-32. https://doi.org/10.1080/088395100117142 (cf. page 10).

Luong, T., Lecuyer, A., Martin, N., & Argelaguet, F. (2022). A Survey on Affective and Cognitive VR. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *28*(12), 5154-5171. https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3110459 (cf. pages 19, 31, 46).

Madary, M., & Metzinger, T. K. (2016). Real Virtuality : A Code of Ethical Conduct. Recommendations for Good Scientific Practice and the Consumers of VR-Technology. *Frontiers in Robotics and AI*, *3* (cf. page 110).

Makowski, D., Sperduti, M., Nicolas, S., & Piolino, P. (2017). "Being there" and remembering it: Presence improves memory encoding. *Consciousness and Cognition*, *53*, 194-202. https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.06.015 (cf. page 17).

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, *77*(12), 1321-1329 (cf. page 29).

Miller, R., Banerjee, N. K., & Banerjee, S. (2022). Combining Real-World Constraints on User Behavior with Deep Neural Networks for Virtual Reality (VR) Biometrics.

2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 409-418. https://doi.org/10.1109/VR51125.2022.00060 (cf. page 111).

Murad, Z., Sefton, M., & Starmer, C. (2016). How do risk attitudes affect measured confidence? *Journal of Risk and Uncertainty*, *52*(1), 21-46. https://doi.org/10.1007/s11166-016-9231-1 (cf. page 81).

Napieralski, P. E., Altenhoff, B. M., Bertrand, J. W., Long, L. O., Babu, S. V., Pagano, C. C., Kern, J., & Davis, T. A. (2011). Near-Field Distance Perception in Real and Virtual Environments Using Both Verbal and Action Responses. *ACM Trans. Appl. Percept.*, *8*(3), 18 :1-18 :19. https://doi.org/10.1145/2010325.2010328 (cf. page 55).

Narkar, A. S., Michalak, J. J., Peacock, C. E., & David-John, B. (2024). GazeIntent : Adapting Dwell-time Selection in VR Interaction with Real-time Intent Modeling. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, *8*(ETRA), 226 :1-226 :18. https://doi.org/10.1145/3655600 (cf. pages 13, 36, 110).

Nelson, T. O. (1990, janvier). Metamemory : A Theoretical Framework and New Findings. In G. H. Bower (Éd.), *Psychology of Learning and Motivation* (p. 125-173, T. 26). Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60053-5 (cf. pages 16, 72).

Norman, D. A. (1993). *Things That Make Us Smart : Defending Human Attributes in the Age of the Machine*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. (cf. page 19).

Norsworthy, C., Dimmock, J. A., Miller, D. J., Krause, A., & Jackson, B. (2023). Psychological Flow Scale (PFS): Development and Preliminary Validation of a New Flow Instrument that Measures the Core Experience of Flow to Reflect Recent Conceptual Advancements. *International Journal of Applied Positive Psychology*. https://doi.org/10.1007/s41042-023-00092-8 (cf. page 22).

Norsworthy, C., Jackson, B., & Dimmock, J. A. (2021). Advancing Our Understanding of Psychological Flow : A Scoping Review of Conceptualizations, Measurements, and Applications. *Psychological Bulletin*, *147*(8), 806-827. https://doi.org/10.1037/bul0000337.supp (cf. page 22).

Offenhuber, D. (2020). What We Talk About When We Talk About Data Physicality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *40*(6), 25-37. https://doi.org/10.1109/MCG.2020.3024146 (cf. page 24).

Paul, D. J., & Ragan, E. D. (2020). Subtle Gaze Direction with Asymmetric Field-of-View Modulation in Headworn Virtual Reality. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 569-570. https://doi.org/10.1109/VRW50115.2020.00136 (cf. page 17).

Peeters, A., & Segundo-Ortin, M. (2019). Misplacing memories? An enactive approach to the virtual memory palace. *Consciousness and Cognition*, *76*, 102834. https://doi.org/10.1016/j.concog.2019.102834 (cf. page 10).

Peifer, C., Schulz, A., Schächinger, H., Baumann, N., & Antoni, C. H. (2014). The relation of flow-experience and physiological arousal under stress — Can u shape it? *Journal of Experimental Social Psychology*, *53*, 62-69. https://doi.org/10.1016/j.jesp.2014.01.009 (cf. page 19).

Pohl, R. F. (Éd.). (2022, mars). *Cognitive Illusions : Intriguing Phenomena in Thinking, Judgment, and Memory* (3e éd.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003154730 (cf. pages 16, 20, 46, 72, 78, 109).

Raisamo, R., Rakkolainen, I., Majaranta, P., Salminen, K., Rantala, J., & Farooq, A. (2019). Human augmentation: Past, present and future. *International Journal of Human-Computer Studies*, *131*, 131-143. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2019.05.008 (cf. pages 21, 23).

Raymond, J. E., Shapiro, K. L., & Arnell, K. M. (1992). Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: an attentional blink? *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *18*(3), 849-860. https://doi.org/10.1037//0096-1523.18.3.849 (cf. pages 85, 97, 101).

Reichherzer, C., Cunningham, A., Barr, J., Coleman, T., McManus, K., Sheppard, D., Coussens, S., Kohler, M., Billinghurst, M., & Thomas, B. H. (2022). Supporting jury understanding of expert evidence in a virtual environment. *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 615-624. https://doi.org/10.1109/VR51125.2022.00082 (cf. pages 18, 37, 46).

Reichherzer, C., Cunningham, A., Coleman, T., Cao, R., McManus, K., Sheppard, D., Kohler, M., Billinghurst, M., & Thomas, B. H. (2021). Bringing the jury to the scene of the crime: memory and decision-making in a simulated crime scene. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-12. https://doi.org/10.1145/3411764.3445464 (cf. page 18).

Reichherzer, C., Cunningham, A., Walsh, J., Kohler, M., Billinghurst, M., & Thomas, B. H. (2018). Narrative and Spatial Memory for Jury Viewings in a Reconstructed Virtual Environment. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *24*(11), 2917-2926. https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2868569 (cf. pages 47, 48, 52, 54, 57, 62, 69).

Rietzler, M., Gugenheimer, J., Hirzle, T., Deubzer, M., Langbehn, E., & Rukzio, E. (2018). Rethinking Redirected Walking : On the Use of Curvature Gains Beyond Perceptual Limitations and Revisiting Bending Gains. *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 115-122. https://doi.org/10.1109/ISMAR.2018.00041 (cf. pages 20, 37).

Rothe, S., Althammer, F., & Khamis, M. (2018). GazeRecall : Using Gaze Direction to Increase Recall of Details in Cinematic Virtual Reality. *Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, 115-119. https://doi.org/10.1145/3282894.3282903 (cf. pages 17, 18, 37, 58).

Sadeghian, S., & Hassenzahl, M. (2021). From limitations to "Superpowers": a design approach to better focus on the possibilities of virtual reality to augment human capabilities. *Designing Interactive Systems Conference 2021*, 180-189. https://doi.org/10.1145/3461778.3462111 (cf. pages 22, 23, 46).

Samad, M., Gatti, E., Hermes, A., Benko, H., & Parise, C. (2019). Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*, 1-13. https://doi.org/10.1145/3290605.3300550 (cf. pages 20, 37).

Shapiro, K. L., Raymond, J. E., & Arnell, K. M. (1997). The Attentional Blink. *Trends in Cognitive Sciences*, *1*(8), 291-296. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(97)01094-2 (cf. pages 22, 32, 85, 97, 101).

Skarbez, R., Polys, N. F., Ogle, J. T., North, C., & Bowman, D. A. (2019). Immersive Analytics : Theory and Research Agenda. *Frontiers in Robotics and AI*, *6*, 82. https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00082 (cf. pages 25-27).

Spittle, B., Frutos-Pascual, M., Creed, C., & Williams, I. (2022). A Review of Interaction Techniques for Immersive Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1-1. https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3174805 (cf. page 26).

Sridharan, S., & Bailey, R. (2015). Automatic target prediction and subtle gaze guidance for improved spatial information recall. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, 99-106. https://doi.org/10.1145/2804408.2804415 (cf. page 17).

Sun, Q., Patney, A., Wei, L.-Y., Shapira, O., Lu, J., Asente, P., Zhu, S., Mcguire, M., Luebke, D., & Kaufman, A. (2018). Towards virtual reality infinite walking: dynamic saccadic redirection. *ACM Transactions on Graphics*, *37*(4), 1-13. https://doi.org/10.1145/3197517.3201294 (cf. pages 20, 32, 37).

Tcha-Tokey, K. (2018). *Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif.* [Thesis]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM. (cf. pages 55, 86, 113).

Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and validation of a questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments. *International Journal of Virtual Reality*, *16*(1), 33-48. https://doi.org/10.20870/IJVR.2016.16.1.2880 (cf. page 55).

Thompson, E. (2010, septembre). *Mind in Life: Biology, Phenomenology, and the Sciences of Mind*. Harvard University Press. (cf. page 10).

Thouvenin, I. M. (2009, février). *Interaction et connaissance : construction d'une expérience dans le monde virtuel* [thesis]. Université de Technologie de Compiègne. (cf. page 10).

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., … Straus, S. E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) : Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine*, *169*(7), 467-473. https://doi.org/10.7326/M18-0850 (cf. page 39).

Tseng, W.-J., Bonnail, E., McGill, M., Khamis, M., Lecolinet, E., Huron, S., & Gugenheimer, J. (2022). The Dark Side of Perceptual Manipulations in Virtual Reality. *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-15. https://doi.org/10.1145/3491102.3517728 (cf. pages 20, 29, 30, 37, 110).

Tsiakas, K., Huber, M., & Makedon, F. (2015). A multimodal adaptive session manager for physical rehabilitation exercising. *Proceedings of the 8th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, 1-8. https://doi.org/10.1145/2769493.2769507 (cf. pages 12, 29, 37).

Undorf, M. (2020). Fluency Illusions in Metamemory. In *Memory Quirks* (p. 150-174). Routledge. (cf. page 16).

Undorf, M., Navarro-Báez, S., & Zimdahl, M. F. (2022). Metacognitive Illusions. In *Cognitive Illusions* (3e éd., p. 17). Routledge. (cf. page 16).

van Gelder, J.-L., Otte, M., & Luciano, E. C. (2014). Using virtual reality in criminological research. *Crime Science*, *3*(1), 10. https://doi.org/10.1186/s40163-014-0010-5 (cf. page 18).

Venkatakrishnan, R., Venkatakrishnan, R., Raveendranath, B., Canales, R., Sarno, D. M., Robb, A. C., Lin, W.-.-C., & Babu, S. V. (2024). The Effects of Secondary Task Demands on Cybersickness in Active Exploration Virtual Reality Experiences. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *30*(5), 2745-2755. https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3372080 (cf. page 11).

Victorelli, E. Z., Dos Reis, J. C., Hornung, H., & Prado, A. B. (2020). Understanding human-data interaction: Literature review and recommendations for design. *International Journal of Human-Computer Studies*, *134*, 13-32. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2019.09.004 (cf. page 26).

Vortmann, L.-M., Knychalla, J., Annerer-Walcher, S., Benedek, M., & Putze, F. (2021). Imaging Time Series of Eye Tracking Data to Classify Attentional States. *Frontiers in Neuroscience*, *15*. https://doi.org/10.3389/fnins.2021.664490 (cf. page 17).

Vortmann, L.-M., & Putze, F. (2021). Combining implicit and explicit feature extraction for eye tracking: attention classification using a heterogeneous input. *Sensors*, *21*(24), 8205. https://doi.org/10.3390/s21248205 (cf. page 17).

Wagner, J., Stuerzlinger, W., & Nedel, L. (2021). Comparing and Combining Virtual Hand and Virtual Ray Pointer Interactions for Data Manipulation in Immersive Analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *27*(5), 2513-2523. https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3067759 (cf. page 26).

White, S., & Feiner, S. (2009). SiteLens : Situated Visualization Techniques for Urban Site Visits. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1117-1120. https://doi.org/10.1145/1518701.1518871 (cf. page 24).

Willett, W., Aseniero, B. A., Carpendale, S., Dragicevic, P., Jansen, Y., Oehlberg, L., & Isenberg, P. (2022). Perception ! Immersion ! Empowerment ! : Superpowers as Inspiration for Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *28*(1), 22-32. https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3114844 (cf. pages 16, 22, 46).

Yang, F.-C., Duque, K., & Mousas, C. (2024). The Effects of Depth of Knowledge of a Virtual Agent. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *30*(11), 7140-7151. https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3456148 (cf. pages 16, 37, 110).

Yang, Y., Dwyer, T., Marriott, K., Jenny, B., & Goodwin, S. (2020). Tilt Map : Interactive Transitions Between Choropleth Map, Prism Map and Bar Chart in Immersive Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *27*(12), 4507-4519. https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3004137 (cf. pages 26, 37).

Yigitbas, E., Heindörfer, J., & Engels, G. (2019). A Context-aware Virtual Reality First Aid Training Application. *Proceedings of Mensch Und Computer 2019*, 885-888. https://doi.org/10.1145/3340764.3349525 (cf. pages 15, 37).

Zahabi, M., & Abdul Razak, A. M. (2020). Adaptive virtual reality-based training: A systematic literature review and framework. *Virtual Reality*, *24*(4), 725-752. https://doi.org/10.1007/s10055-020-00434-w (cf. pages 11, 12, 19, 29).

Zhao, L., Isenberg, T., Xie, F., Liang, H.-N., & Yu, L. (2024). MeTACAST : Target- and Context-Aware Spatial Selection in VR. *IEEE Transactions on Visualization and*

Computer Graphics, *30*(1), 480-494. https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3326517 (cf. pages 15, 37).

Zuki, F. S. M., Merienne, F., Sulaiman, S., Ricca, A., Rambli, D. R. A., & Saad, M. N. M. (2022). Gamification, Sensory Feedback, Adaptive Function on Virtual Reality Rehabilitation : A Brief Review. *2022 International Conference on Digital Transformation and Intelligence* (*ICDI*), 330-335. https://doi.org/10.1109/ICDI57181.2022.10007124 (cf. pages 11, 12, 29).

CHAPITRE A

ANNEXES

Scénario fourni aux participants de l'expérience lors de la phase 1 - chapitre 3

Ceci est la retranscription écrite de l'interview du déposeur de la plainte. Les questions des officiers de police n'ont pas été retranscrites. Vous n'avez devant vous que les réponses d'une même personne, le déposeur de la plainte.

- Oui, Mr CHENEVIER, c'est bien moi.
- J'ai tout de suite compris que c'était un vol vous savez. En arrivant le matin je pose toujours mes clefs et ce que j'ai dans les poches sur la petite table ronde. Et là, en plus de l'inhabituel bazar dans la pièce, j'ai tout de suite vu qu'il n'y avait plus rien sur cette table en rentrant après la réunion et la pause-café…
- Oui vers 19h15 du coup, mon collègue et moi on finissait tard ce soir-là. On a tout de suite cherché ce qui nous avait été volé évidemment.
- Exactement. Ça n'a pas loupé : la tablette graphique WACOM de mon collègue qui était sur son bureau, et mon MACBOOK, mon casque BOSE sur le mien. Ils ont même fouillé dans les tiroirs de mon bureau pour récupérer ma tablette SONY, c'est fou !
- Je ne comprends pas pourquoi ils ont pris la jolie statue de décoration à l'entrée. Elle ne vaut rien mais nous servait de serre-livre et elle était si jolie dans la bibliothèque !
- Enfin bref, on est trois habituellement mais ma collègue, dont le bureau est près de la bibliothèque, est en vacances donc elle n'avait rien eu de volé. En revanche devant son bureau il y avait le sac de mon collègue. Disparu aussi comme vous vous en doutez…
- C'est la première fois que ça arrive depuis que je suis sur ce campus de SORBONNE UNIVERSITÉ. On espère que vous allez pouvoir retrouver les coupables !

L'études des caméras de surveillance a permis à la police d'appréhender les suspects.

Questionnaire IVEQ utilisé lors des deux études - chapitre 3 & chapitre 4

Ensemble des questions de l'IVEQ utilisé lors de nos deux études. Chaque réponse se situe sur une échelle de Likert en 10 points (1 = Pas du tout d'accord, 10 = Tout à fait d'accord).

N°	Question	Échelle
1	Mes interactions avec l'environnement virtuel me semblaient naturelles.	*Présence*
2	J'étais en mesure d'explorer activement l'environnement virtuel de façon visuelle.	*Présence*
3	À une distance proche, je pouvais bien examiner les objets.	*Présence*
4	Je pouvais examiner les objets sous différents angles.	*Présence*
5	En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, je me suis senti(e) compétent(e) à la fin de l'expérience.	*Présence*
6	Je suis parvenu(e) à me concentrer sur les tâches requises plutôt que sur les périphériques d'interaction (manette et/ou clavier).	*Présence*
7	Les aspects visuels de l'environnement virtuel m'invitaient à m'y impliquer.	*Engagement*
8	La sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était réaliste.	*Engagement*
9	J'étais impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel.	*Engagement*
10	Je me sentais stimulé(e) par l'environnement virtuel.	*Immersion*

(*Le tableau continue à la page suivante*)

N°	Question	Échelle
11	Il m'est arrivé d'être tellement absorbé(e) dans l'environnement virtuel que je n'étais plus conscient(e) des choses qui pouvaient se passer autour de moi.	*Immersion*
12	Il m'est arrivé d'être tellement absorbé(e) dans l'environnement virtuel que j'avais l'impression d'être à l'intérieur du jeu plutôt qu'en train de manœuvrer des manettes de jeu et de regarder un écran.	*Immersion*
13	Physiquement, je me sentais bien dans l'environnement virtuel.	*Immersion*
14	Il m'est arrivé(e) d'être absorbé(e) dans le jeu à un point tel que j'en ai perdu la notion du temps.	*Immersion*
15	Je sentais que je contrôlais parfaitement mes actions.	*Flow*
16	À chaque étape, je savais ce que je devais faire.	*Flow*
17	J'avais le sentiment de bien contrôler la situation.	*Flow*
18	Le temps semblait s'écouler de façon différente de d'habitude.	*Flow*
19	J'avais l'impression que le temps passait rapidement.	*Flow*
20	Je perdais la notion du temps.	*Flow*
21	Je n'étais pas préoccupé(e) par ce que les autres pouvaient penser de moi.	*Flow*
22	J'avais le sentiment de vivre un moment enthousiasmant.	*Flow*

(*Le tableau continue à la page suivante*)

N°	Question	Échelle
23	Cette expérience dans l'environnement virtuel me procurait beaucoup de bien-être.	*Flow*
24	Quand j'évoque cette expérience dans l'environnement virtuel, je ressens une émotion que j'ai envie de partager.	*Flow*
25	J'ai apprécié être dans cet environnement virtuel.	*Émotion*
26	Pendant que j'étais dans l'environnement virtuel, j'ai perdu le fil de mes pensées.	*Émotion*
27*	Les périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) étaient très ennuyeux.	*Émotion*
28	Lorsque mes actions fonctionnaient, je ressentais une montée d'émotion positive.	*Émotion*
29*	Lorsque j'utilisais ces périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier), je trouvais le temps long.	*Émotion*
30	J'ai apprécié le défi que représentait l'apprentissage des périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle.	*Émotion*
31	J'ai apprécié avoir affaire aux périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) de l'environnement virtuel.	*Émotion*
32**	Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est : Pas pratique / Pratique.	*Jugement*
33**	Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est : Confus / Clair.	*Jugement*
34**	Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est : Incontrôlable / Maîtrisable.	*Jugement*

(*Le tableau continue à la page suivante*)

N°	Question	Échelle
35**	J'ai trouvé que cet environnement virtuel est : Ennuyeux / Enthousiasmant.	*Jugement*
36**	J'ai trouvé cet environnement virtuel : Amateur / Professionnel.	*Jugement*
37**	J'ai trouvé cet environnement virtuel : De mauvais goût / De bon goût.	*Jugement*
38**	J'ai trouvé cet environnement virtuel : Non présentable / Présentable.	*Jugement*
39**	J'ai trouvé que cet environnement virtuel est : Laid / Beau.	*Jugement*
40**	J'ai trouvé que cet environnement virtuel est : Désagréable / Agréable.	*Jugement*
41*	Je me suis senti(e) fatigué(e) durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*
42*	J'ai ressenti des maux de tête durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*
43*	J'ai ressenti une fatigue visuelle durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*
44*	J'ai remarqué une augmentation de ma salivation durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*
45*	J'ai eu des nausées dans l'environnement virtuel.	*Conséquences*
46*	J'ai eu une impression de lourdeur dans la tête durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*

(*Le tableau continue à la page suivante*)

N°	Question	Échelle
47*	Je me suis senti(e) étourdi(e) lorsque j'ouvrais les yeux durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*
48*	J'ai ressenti des vertiges durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	*Conséquences*
49	Si j'utilise de nouveau le même environnement virtuel, mon interaction avec l'environnement sera claire et compréhensible pour moi.	*Adoption Technologie*
50	J'arriverai aisément à acquérir les compétences requises pour utiliser cet environnement virtuel.	*Adoption Technologie*
51	Faire fonctionner à nouveau cet environnement virtuel sera facile pour moi.	*Adoption Technologie*
52*	Utiliser ces périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle est une mauvaise idée.	*Adoption Technologie*
53	Les périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle pourrait rendre mon travail plus intéressant.	*Adoption Technologie*
54	J'aimerais bien utiliser ces périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle dans mon travail.	*Adoption Technologie*
55	J'ai les ressources nécessaires pour utiliser ces périphériques d'interaction (casque RV, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle.	*Adoption Technologie*
56	À votre avis, quels ont été les points positifs de votre expérience ?	*X*
57	À votre avis, quels ont été les points négatifs de votre expérience ?	*X*

(*Le tableau continue à la page suivante*)

N°	Question	Échelle
58	Avez-vous des suggestions pour améliorer cet environnement de réalité virtuelle ?	*X*

Table A.1 – *Questions de l'IVEQ utilisées lors de nos études.*

Les astérisques désignent :

- * : utilisation d'une échelle Likert avec un score inversé. 10 = Pas du tout d'accord, 1 = Tout à fait d'accord.
- ** : utilisation d'une échelle sémantique différentielle. 1 = adjectif négativement connoté (*e.g.*, pas pratique, flou, amateur, ...), 10 = adjectif positivement connoté (*e.g.*, pratique, clair, professionnel,...).