


Novembre 2023

Thèses professionnelles de Mastère Spécialisé designer
d'expérience interactive et ludique



Comment designer une expérience de réalité virtuelle accessible en visite libre dans un musée ?

Présenté Par :
Viudes Paul

Encadré Par :
Alexis Amen
Jérôme Dupire

Résumé

Au fil de cette thèse, notre exploration se concentrera sur la conception approfondie d'une expérience de réalité virtuelle conçue pour être accessible en visite libre dans un musée. Afin d'appréhender cette problématique de manière exhaustive, nous entamerons notre parcours en analysant le contexte dans lequel le projet prend forme, notamment la rénovation du nouveau Palais de la découverte. Nous approfondirons notre compréhension en nous attardant sur la définition de termes clés tels que l'accessibilité et la réalité virtuelle. Par la suite, nous procéderons une évaluation des solutions existantes, tant du point de vue du matériel que des expériences de réalité virtuelle déjà présentes dans le cadre muséal.

Le volet suivant de notre exploration consistera en une analyse détaillée de la conception de l'expérience. Nous aborderons le choix du matériel et nous réfléchirons à l'emplacement optimal d'exposition du prototype. La trajectoire de notre étude suivra l'intégralité du processus de création d'une application de réalité virtuelle, avec une emphase particulière sur l'intégration de l'accessibilité au cœur de notre approche. Au sein de ce processus, je mettrai en évidence les fonctionnalités spécifiques qui ont été intégrées, tout en mettant en lumière les retours constants des utilisateurs qui ont été essentiels pour l'amélioration continue de l'expérience.

Dans le prolongement de notre investigation, nous nous intéresserons sur les différents tests auxquels cette application sera soumise. Parmi ces essais, nous examinerons attentivement ceux réalisés dans le cadre de la Paris Games Week, ainsi que ceux menés au sein d'une étude avec le prestataire « Indivisible ». Ce cheminement global vise à apporter des éclairages approfondis sur la conception, le développement et la mise à l'épreuve d'une expérience de réalité virtuelle en espace muséale, tout en mettant en avant les nuances inhérentes à l'accessibilité au sein de cette démarche inclusive.

Mots-clés : réalité virtuelle, accessibilité, musée, cocréation, design, Universciences, Palais de la découverte

Remerciements

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mon tuteur d'entreprise d'Universciences, Alexis Amen, et mon tuteur académique et chercheur du laboratoire CEDRIC, Jérôme Dupire, pour leur supervision attentive de mon travail, leur confiance et surtout leurs précieux conseils.

Un grand merci à toute l'équipe d'Universciences avec laquelle j'ai collaboré, notamment à Camille Rage, Donatien Lenoir, Justine Gasc, Vincent Blench, Jean Michel Courty pour leur soutien tout au long de ce projet. Mes remerciements vont également à Myriam de Martigues, déficiente auditive, pour sa participation bénévole lors du prototypage de la version LSF.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'équipe pédagogique et les autres étudiants de ma promotion pour leur soutien tout au long de cette année de formation très enrichissante. Enfin, un grand merci à mes parents pour leur soutien.

Sommaire

Table des matières

Introduction.....	6
Partie 1 : État de l'art.....	7
I) Le nouveau Palais de la découverte	7
Présentation générale.....	7
La balade dimensionnelle	9
II) La Réalité Virtuelle.....	12
Définitions.....	12
La réalité virtuelle et les musées.....	13
La réalité virtuelle en visite libre	17
III) L'Accessibilité	19
Définitions.....	19
Accessibilité à Universciences.....	21
Accessibilité et VR	22
Partie 2 : Expérimentations	27
I) Définitions du projet.....	27
Objectif du prototype.....	27
Description du matériel et des outils utilisés.....	27
Lieu d'exposition	29
Consignes	30
Personnes impliquées dans le projet	33
II) Phase de conception.....	34
Conception du scénario du multimédia.....	34
Organisation	36
III) Première Itération	37
Développement des interactions.....	37
Enregistrement de la voix et Timeline	40
Interface pour sous-titres.....	42
Observations des publics et ajustements	43
IV) Deuxième Itération.....	46
Ajout de nouvelles fonctionnalités	46

Audio description et Sound design	48
Paris Games Week et Tests d'accessibilités	50
Étude de l'agence « Indivisible »	52
Amélioration après la deuxième version	57
Conclusion	58
Tables des Figures.....	59
Bibliographies	61
Annexes	64

Introduction

En 1937 André Léveillé et Jean Perrin crée le Palais de la découverte lors de l'exposition universelle de cette année. Les expériences sont refaites sous les yeux des visiteurs par des « démonstrateurs » [1] (nommée médiateur plus tard) qui les expliquent, s'aider au besoin de phonogrammes¹ synchronisés ou de films cinématographiques. Au vu du succès de cette exposition, le palais de la découverte devient permanent. Il continue depuis à proposer de nombreuses médiations et d'expositions permanentes ou temporaires libres sur de nombreux sujets (Le Jouet 1965, Les dinosaures 1989, La lumière 2005, L'amour 2019 et bien d'autres...).

En 2009, la Cité des sciences et de l'industrie et le Palais de la découverte fusionnent pour devenir Universciences un établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de la Culture.

En 2020, le palais de la découverte ferme ses portes pour cause de rénovation des bâtiments et des salles de médiations. Profitant de cette rénovation, une nouvelle exposition en visite libre est prévue. C'est sur cette nouvelle exposition que mon équipe et moi travaillons, plus précisément nous sommes attachés à la conception des multimédias. Nous avons une vingtaine de multimédia traitants les sept disciplines (Astronomie, Science de la vie, Géosciences, Physique, Chimie, Informatique, Mathématique). Pour chaque multim  dia² nous devons concevoir un scénario ainsi que trouver quel moyen technologique permet au mieux de transmettre le message scientifique sélectionner par les mus  ographes. Lors de la conception d'un multimédia voulant expliquer comment agissent les forces à différentes échelles, il nous est apparu qu'une des solutions techniques les plus adaptées semblait être la réalité virtuelle. La réalité virtuelle pose un certain nombre de problèmes et de questionnements par exemple : Est-il possible d'installer dans une exposition un casque de réalité virtuelle en accès libre ? Comment minimiser la friction que peut avoir ce dispositif, en d'autres termes comme pallier l'appréhension que les personnes peuvent avoir face à ce dispositif ? Que mettre en place pour rendre ce dispositif accessible à différentes typologies de public ?

¹ **Phonogrammes** : est un appareil destiné d'abord à graver, puis à reproduire du son (paroles ou musiques) par un procédé purement mécanique

² **Multimédia** : terme utilisé pour désigner un dispositif interactif numérique

Partie 1 : État de l'art

I) Le nouveau Palais de la découverte

Présentation générale

Situé dans l'aile ouest du Grand Palais, le Palais de la Découverte, n'a encore jamais bénéficié d'une rénovation complète depuis sa création en 1937. Tandis que de nombreuses institutions culturelles majeures, telles que le Musée des arts et métiers, le musée de l'Homme, et bien d'autres, ont été rénovées.

Profitant de sa première rénovation complète, le Palais de la découverte décide, pour sa réouverture en 2025, de recentrer son cœur de cible et son approche. En effet, l'Humain sera dorénavant au centre de l'expérience du musée. Pour ce faire, il donnera un rôle plus important à la médiation et aux dialogues avec les chercheurs. Voici comment les espaces de médiations seront divisés :

- **Les salles d'exposés** seront séparées par sciences fondamentales, une salle représentant une science (Maths, Informatique, Science de la Vie, Géoscience, Chimie, Astronomie et Physique) et seront réparties dans les galeries sur deux étages.
- **Les laboratoires** seront des espaces où se dérouleront les médiations « pratiques » interdisciplinaires, le visiteur mettra en pratique ses connaissances nouvellement acquises et expérimentera la science à travers différents ateliers.
- **Le laboratoire du vivant** sera une grande serre, de 100 m², où on pourra observer la flore tropicale.
- **La salle à distance** sera une salle de médiation immersive et interactive. Une projection sera constamment mappée³ sur le sol et sur une des faces des murs de la salle.
- **La salle « Un chercheur, Une manip »**, est une salle où un chercheur proposera une médiation et des expériences sur son thème de recherche.



Figure 1 Plan provisoire du futur Palais de la découverte

³ **Mapping** : Technique qui consiste à projeter à grande échelle des éléments visuels (images, vidéos, jeux de lumière, rayons laser, etc.) sur une surface en relief

L'autre partie sera la visite libre qui permettra aux visiteurs de profiter d'apprendre en autonomie en dehors des médiations. Cette offre muséographique sera constituée des « Manips icones », qui seront de grandes installations par exemple un ordinateur de 8 mètres de long fonctionnant uniquement avec des billes. Mais aussi de « Sciences actualité », qui traitera de l'actualité scientifique et sera mise à jour régulièrement. Il y aura aussi des installations « Arts et sciences », qui seront un lien entre, le grand palais et le palais de découverte. Ces installations seront composées d'œuvres d'art s'inspirant de concepts scientifiques. Et enfin, la partie la plus centrale de la visite libre, sur laquelle je travaille se nomme : les « îlots de curiosité ».

Les « îlots de curiosité » offriront des clés de compréhension pour les sciences fondamentales, en les reliant à leur importance dans notre vie quotidienne. Chaque îlot sera conçu comme une entité autonome qui incitera, autant à s'interroger qu'à s'émerveiller. Ils permettront aux visiteurs d'approfondir leurs compréhensions d'une discipline scientifique à travers des expériences, des observations et des questionnements. En visite libre, ces îlots viennent en complément des visites guidées par les médiateurs. Ils ont pour but de susciter la curiosité du public pour découvrir un sujet dont les visiteurs n'ont parfois que quelques notions.

Chaque îlot, de 20 m², sera constitué d'un micro-espace d'exposition indépendant, dédié à une thématique spécifique. Les îlots seront mis en scène à l'aide d'une grande diversité de dispositifs muséographiques (Audiovisuel, Multimédia interactive, Manip électromécanique...) permettant différentes implications du visiteur dans son parcours.

Ces îlots sont divisés en 3 typologies :

- **Les îlots multidisciplinaires** : traiteront d'une des sciences fondamentale (Maths, Informatique, Science de la Vie, Géoscience, Chimie, Astronomie et Physique) mais seront mélangés dans les galeries afin que les galeries soient interdisciplinaires. Ils seront présentés sur une table ou suspendus, comme un vaste cabinet de curiosité composé d'outils de découvertes et de maquettes d'observation.

- **Les îlots de recherche contemporaine** : aborderont des sujets de recherche complexe et actuel comme la conscience, la physique quantique, les océans. Ils mettent en avant les scientifiques avec une scénographie qui sera composée de plusieurs surfaces de diffusion audiovisuelles.

- **Les îlots de la fabrique des savoirs scientifiques** : seront une série d'îlots qui expliquent comment se créent les connaissances scientifiques. Avec les défis que doivent relever les chercheurs, par exemple : les étapes d'écriture d'un article, la rigueur des expériences ...



Figure 2 Design des îlots de multidisciplinaires

La balade dimensionnelle

La balade dimensionnelle sera un dispositif d'un îlot multidisciplinaire de physique sur la diversité des phénomènes et les lois universelles. L'objectif de cet îlot sera, d'avoir des clés de lecture sur la diversité des phénomènes naturels observés, ressentir les mondes imperceptibles à d'autres échelles. La balade dimensionnelle serait un voyage en réalité virtuelle à travers les différentes échelles de la matière. Si nous sommes familiers des comportements de la matière et des effets physiques à notre échelle, nous serions surpris de nous retrouver dans le monde **nanomètre**, le monde **micromètre** ou le monde **mégamètre**. Pas si éloignés les uns des autres, et pourtant nous assisterons à des scènes de comportements inattendus de la matière, en raison des rapports différents entre les forces.

L'objectif de cette expérience est :

- Appréhender les différentes distances qui séparent les différentes échelles afin de ressentir qu'elles ne sont pas si éloignées.
- Se familiariser avec la matière et ses comportements aux petites et grandes échelles.
- Voir le monde à travers les lunettes de la physique : décrypter le monde visible (formes, mouvements) avec quelques notions de physique fondamentale.

Nous avons donc travaillé avec le muséographe Vincent Blech et le commissaire scientifique Jean-Michel Courty pour créer une première version d'un scénario complet. Voici un résumé de ce scénario :

Échelle du mètre :

Nous commençons l'expérience à l'échelle du mètre : quand on met le casque, la première chose que nous voyons est le monde extérieur en vision « passtrought ». Ensuite, un assistant nous accueille tandis que des plantes et des animaux investissent le Palais. L'assistant fait apparaître une couche graphique d'explications « Physiques » illustrant les forces et les mouvements de la matière. Il explique que des forces agissent autour de nous, que nous nous déplaçons dans le monde sans y prêter attention. Il souligne, ensuite, la présence de fluides en attirant notre regard vers un oiseau et un poisson, tout en dévoilant les mouvements de fluides qui les entourent. Des explications sont données sur la viscosité⁴, la portance⁵ et la traînée⁶. Puis, il nous incite à arroser les plantes avec un spray émettant des gouttelettes de tailles variées.

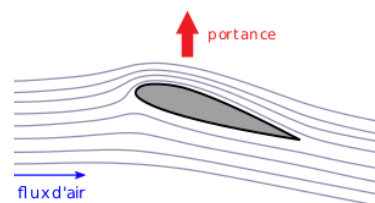


Figure 3 Schéma sur la portance de l'air

Échelle du millimètre :

A la fin de l'expérience du mètre, nous nous réduisons à l'échelle de 10 mm, observant de grosses et petites gouttes tomber comme une pluie. Le premier mini jeu consiste à attraper une goutte et à la lancer pour atteindre une cible. Ce premier jeu est suivi d'une explication sur l'effet prédominant de la gravité, soulignant la lourdeur des gouttes.

Échelle du micromètre :

Nous réduisons de nouveau à 100 micromètres, à cette échelle, on devient très sensible aux mouvements de l'air ambiant, il paraît alors très dense et nous avons la sensation de flotter. Notre corps a peu de masse, on est si léger que la vitesse de chute libre est plus lente que les mouvements de l'air. La force dominante est celle des frottements de l'air ainsi les microgouttes autour de nous flottent. Une amibe⁷ (figure 4) et une bactérie, la couche « physique », nous donnent des explications sur la locomotion de ces organismes en milieu visqueux. Le deuxième mini jeu nous permet d'agir sur les gouttes d'eau en modifiant les mouvements d'air pour leur faire atteindre une cible.

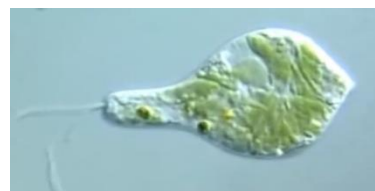


Figure 4 Amibe observée au microscope

⁴ **Viscosité** : Propriété physique d'un fluide, impliquant une relation entre les contraintes et les vitesses de déformation.

⁵ **Portance** : Composante de la résultante des forces de pression qui s'exercent sur un corps en mouvement dans un fluide, perpendiculaire à la direction de la vitesse. (C'est elle qui assure la sustentation d'un avion dans l'air ; elle résulte dans ce cas de la différence des vitesses relatives des filets d'air, donc des pressions, entre les faces supérieure et inférieure de l'aile.)

⁶ **Traînée** : Composante de la résultante des forces aérodynamiques s'exerçant sur un corps en déplacement dans l'air, parallèle à la vitesse et de sens opposé.

⁷ **Amibe** : Protozoaire des eaux douces ou salées, des sols humides, se déplaçant grâce à des pseudopodes, dont certaines espèces parasitent l'intestin de l'homme. (Taille entre 30 et 500 micromètres ; classe des rhizopodes.)

Échelle du nanomètre :

Nous nous réduisons à 100 nm, l'assistant nous explique qu'ici la matière est discontinue où on peut voir les atomes. Nous sommes dans un univers complètement étranger avec un immense brin ADN, des virus, des bactéries avec des moyens de locomotion spéciaux, comme la propulsion par flagelles (figure 5). La gravité est négligeable par rapport à la cohésion et les liaisons chimiques. Les atomes ont un mouvement chaotique qu'on appelle les mouvements browniens, il est donc difficile de se déplacer. Le troisième mini jeu consiste à diriger une centaine de nano gouttes vers la cible en évitant des obstacles qui sont des aléas browniens. A chaque aléa, on perd une partie des gouttes d'eau : l'objectif est qu'une goutte atteigne la cible.



Figure 5 Bactérie avec propulsion par flagelles

Échelle du mégamètre :

Nous allons ensuite grandir jusqu'à 10 mégamètres où nous voyons le soleil. Une météorite passe, expliquant les formes de caillou à sphère parfaite. Le dernier jeu implique d'attraper une météorite, illustrant sa lourdeur et la difficulté à la déplacer. Nous sommes ensuite invités à la lancer, soulignant les trajectoires prévisibles dans le vide sous l'effet de la gravité.

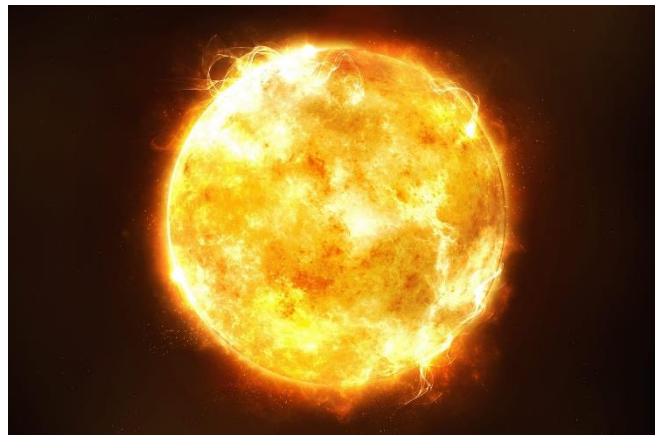


Figure 6 Illustration du soleil

Nous revenons au Palais, retrouvant les échelles spatiales et temporelles normales, marquant la fin du voyage.

Ce scénario est encore en finalisation, mais pour tester sa faisabilité notre prototype se concentrera seulement sur une portion de l'expérience finale. Notre choix s'est porté sur l'échelle du mètre et du millimètre pour tester la prise en main et le rétrécissement.

II) La Réalité Virtuelle

Définitions

Depuis ces quelques années le terme « réalité virtuelle » est de plus en plus utilisé. Mais il peut aussi être confondu avec d'autres termes comme réalité augmentée, mixte, étendue. On peut se baser sur le continuum (figure 7) entre la réalité et la virtualité de Paul Milgram [1] pour mieux définir ces concepts.

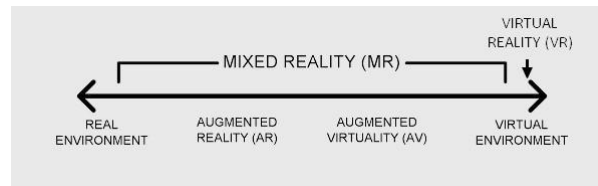


Figure 7 Continuum entre réalité et virtualité

Cette échelle va du monde réel à un environnement complètement virtuel.

La **Réalité Augmentée ou AR** consiste à ajouter du contenu virtuel dans le monde réel. On peut penser à des applications sur nos téléphones comme « Pokémon Go » ou l'application IKEA qui nous permet de choisir nos meubles virtuels dans un environnement réel. Mais le terme de réalité augmentée peut remonter à la technique d'illusion optique appelée Pepper's Ghost en 1862 [2] qui, par un jeu d'éclairage et de reflet, permet de projeter un acteur transparent (comme un hologramme) dans un décor réel (figure 8).

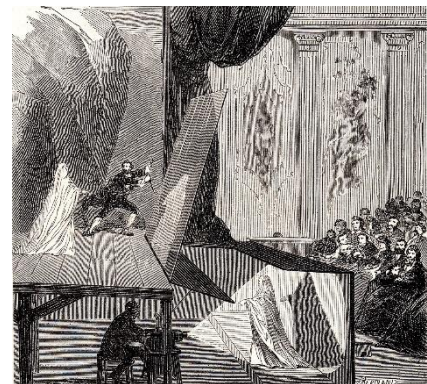


Figure 8 Paper's Ghost

La **Virtualité Augmentée ou AV** consiste à ajouter du contenu réel dans le monde virtuel. Cela permet de rajouter des objets suivis dans le monde virtuel. C'est une technologie utilisée dans l'industrie automobile avec BMW [3]. Elle immerge les participants en leur proposant de conduire une voiture dans un environnement virtuel mais avec un volant réel.



Figure 9 Expérience de virtualité augmentée de BMW

La **Réalité Mixte ou MR** est une combinaison d'objets du monde réel et d'objets virtuels. Ce terme englobe la réalité augmentée à la virtualité augmentée.

La **Réalité Virtuelle ou VR** est le terme utilisé pour désigner le fait que nous nous situons uniquement dans un monde virtuel immersif. L'immersion en VR dépend principalement de nos sens. Elle est définie par les chercheurs Kim & Biocca comme, *"le degré où la variété de canaux sensoriels est engagée par la simulation virtuelle"* [4]. Elle est donc soumise aux évolutions technologiques comme une plus haute résolution d'écran, un retour haptique⁸ ou encore une sortie audio de plus haute qualité. La Réalité virtuelle a donc plusieurs champs d'application, que ce soit dans les jeux vidéo (Beat Saber, Superhot), le cinéma d'animations, l'industrie, la médecine ou les musées.

La **Réalité étendue ou XR** est un terme englobant qui fait référence à toutes les formes de réalité virtuelle (VR), réalité augmentée (AR) et réalité mixte (MR).

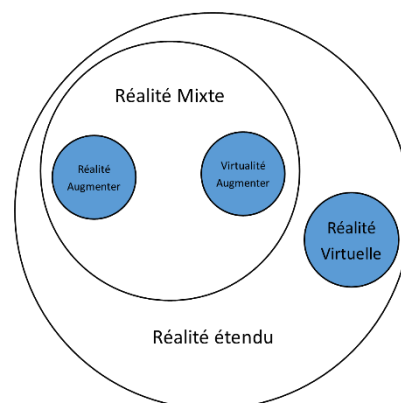


Figure 10 Schémas récapitulatif de la XR

La réalité virtuelle et les musées

La XR est depuis longtemps utilisée dans les musées. Par exemple, en 1892 le musée Grévin présente le théâtre optique (une évolution du Pepper Ghost). Ce dispositif permettait de diffuser des films où les acteurs étaient représentés sous une forme transparente sur un décor réel (figure 10). Ce procédé est encore utilisé aujourd'hui dans de nombreux musées, dont la cité des sciences et le palais de la découverte.



Figure 11 Théâtre optique

Concernant, pour la réalité virtuelle, il a fallu attendre les années 2010 avec l'apparition de casque (comme le cardboard de google et des premiers oculus) pour pouvoir proposer des expériences en VR dans les musées. Des chercheurs, comme Hyunae Lee [5], définissent deux catégories pour les expériences de VR dans les musées avec, comme paramètre, le besoin auquel elle répond. Les deux catégories sont : **l'authenticité et la nouvelle muséologie**.

Voir l'œuvre originale, voilà ce qui peut inciter certains visiteurs à se déplacer dans les musées. Ils peuvent chercher, à travers cette expérience, à ressentir un sentiment d'authenticité. La présence d'œuvres originales est importante pour les musées dit "authentique" car l'expérience muséologique se déroule autour de celles-ci. Elle permet aussi aux musées de se différencier entre eux, chaque musée ayant leur propre spécificité (courant artistique, période, typologie d'œuvre...), ce qui attire différents types de public. Cela entraîne plusieurs problèmes : la dégradation des œuvres (par la nature ou l'homme), des coûts économiques, l'évolution générale de la mission des musées : qui ne se concentre plus sur les collections mais sur les expériences des visiteurs (Pallud et al., 2010). En réponse

⁸ **Haptique** : Se dit de ce qui concerne la sensibilité cutanée.

à ces problématiques, la réalité virtuelle semble être un outil adapté. Elle a comme principale qualité d'être immersive et de faire ressentir aux visiteurs le sentiment de "présence" de l'œuvre. Ce même sentiment qui est défini par Slater comme le sentiment "d'être là" [6]. Elle permet aussi de pallier le problème de la dégradation car elle ne nécessite pas toujours la présence physique de l'œuvre. Ces deux qualités permettent aux visiteurs de percevoir les expériences virtuelles, substitutives à l'original, comme authentiques [7]. La VR permet aussi d'ajouter, dans l'expérience, des informations dynamiques et peut octroyer la possibilité aux visiteurs de manipuler l'œuvre, manipulations qui n'auraient pas été permises avec l'œuvre originale. Ces nouvelles possibilités peuvent augmenter l'engagement du visiteur et capter plus longtemps son attention [8].

La nouvelle muséologie est définie par Vergo en 1989 [9] suite à une crise des musées dans la fin des années 1960. En 1968, les musées sont vivement critiqués car ils deviennent le symbole d'une société bourgeoise et élitiste. Ils se contentent d'exposer des collections rares et sont rarement accessibles au plus grand nombre de visiteurs. Face à ce constat, l'objectif principal de la nouvelle muséologie est de concevoir des expositions qui pourront, à la fois, engager et instruire le visiteur grâce à la collection du musée. Les musées commencent alors à ramener le jeu au service de l'apprentissage. Ce procédé est appelé "edutainment", un mot valise qui peut se traduire en français par ludo-éducation [10]. Les précurseurs, en France, de ce nouveau système sont le Palais de la découverte et la cité des sciences. Ces musées n'exposent pas d'objet mais mettent au centre de la conception des expositions : l'expérience du visiteur. Durant les années qui ont suivi, ces musées ont continué à innover, que ce soit en termes de muséologie, d'approche visiteur, mais aussi technologiquement avec l'ajout de nouveaux dispositifs. La réalité virtuelle s'inscrit dans ce mouvement, poussée par les chercheurs qui affirment que la VR serait un dispositif permettant d'améliorer l'apprentissage et la concentration avec, comme avantage, d'être ludique.

La réalité virtuelle peut aussi être classée en quatre niveaux d'interactivités :

- 1) Le premier niveau, avec aucune interactivité, concerne les films en 360°. Dans la catégorie « nouvelle muséologie » : le dispositif « Space Descent » (figure 12) installé au musée de Science de Londres retrace le voyage de 400 km de la terre à la Station Spatiale Internationale. Dans la catégorie « authenticité », nous avons le dispositif « Le voyage intérieur de Gauguin » (figure 11). Ce dernier nous emmène suivre Gauguin, comme si nous étions transportés dans un rêve, lors de son tout premier



Figure 12 Le voyage intérieur de Gauguin



Figure 13 Space Descent 360°

voyage à Tahiti, à la découverte de certaines de ses œuvres, notamment « Joyeusetés » et « Tahitienne à la fleur ».

- 2) Dans le deuxième niveau d'interactivité, nous trouvons des expériences où l'on peut seulement interagir avec la tête pour se déplacer ou obtenir des informations. Ce niveau d'interactivité est principalement utilisé dans la catégorie "authentique", comprenant des visites virtuelles de musées et de lieux tels que la visite virtuelle du Petit Palais [11] (figure 14) ou encore la visite du British Museum (figure 13), qui propose également des infographies exclusives pour la réalité virtuelle.



Figure 15 Visite VR du Petit Palais



Figure 14 Visite VR du British Museum

- 3) Au troisième niveau, nous avons les casques avec 6 degrés de liberté et des manettes ou un suivi des mains. Cela permet une plus grande diversité d'interactions avec une reconnaissance de mouvements plus fine. On peut citer l'expérience "Voyage au cœur de l'évolution" (figure 15), exposée encore aujourd'hui au Muséum national d'histoire naturelle de Paris, qui s'inscrit dans la catégorie de la "nouvelle muséologie". Dans cette expérience, nous explorons l'arbre du vivant en consultant les caractéristiques des espèces et en retraçant leurs origines à travers leurs ancêtres [12]. Dans la catégorie "authenticité", on peut mentionner l'expérience de La Joconde, qui permet de s'approcher au plus près de l'œuvre, de découvrir tous ses secrets et même de voyager dans son décor à l'aide d'une machine de Léonard de Vinci. On peut également penser à des expériences telles que "Curious Alice : The VR Experience", qui se situe à la lisière entre les deux catégories et qui a servi d'inspiration pour le dispositif du Palais. Cette expérience a été exposée du 22 mai au 31 décembre 2021 au Victoria and Albert Museum et retrace les événements du roman de Lewis Carroll. Elle utilisait la technologie du suivi des mains, ce qui est plus intuitif que des manettes. Bien que dirigée, l'expérience offre une grande diversité d'interactions avec une direction artistique assumée qui ne cherche pas à reproduire le réalisme. De plus, l'expérience bénéficiait d'une scénographie particulièrement réussie (figure 16), plongeant le public dans l'univers d'Alice au pays des merveilles avant de mettre le casque.



Figure 17 Curious Alice: the VR experience

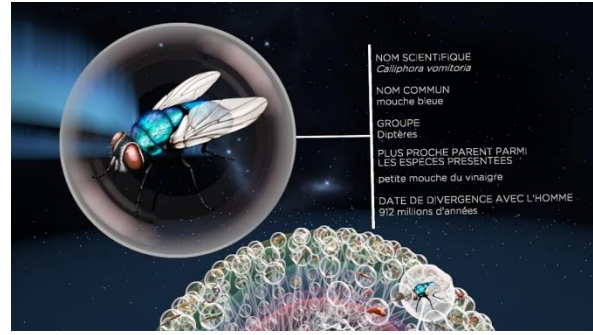


Figure 16 Voyage au cœur de l'évolution

- 4) En ce moment, le dernier niveau d'interactivité est la combinaison de casque avec 6 degrés de liberté combiné un backpack (un ordinateur sac à dos) et d'une grande salle vide où l'on peut se déplacer en marchant sans être gêné par le casque. On peut penser à Notre Dame de Paris (figure 17) ou la pyramide de Khéops qui nous plongent dans ces lieux que l'on ne peut visiter, en nous expliquant leur histoire. Pour la catégorie « Nouvelle Muséologie » nous avons le dispositif « Des mondes disparus » au muséum d'histoire naturelle (figure 18) qui permet de vivre les grandes étapes de l'évolution de la vie, des premiers organismes à l'humain en passant par les dinosaures.



Figure 19 Visite virtuelle de Notre Dame de Paris



Figure 18 Des mondes disparus au muséum d'histoire naturelle

On constate que les musées offrent une diversité d'expériences en réalité virtuelle, mais la majorité d'entre elles, repose sur le même modèle économique. En effet, la réalité virtuelle est souvent proposée moyennant un ticket supplémentaire ou en tant que supplément à une exposition. Cela s'explique par le fait qu'un médiateur doit être présent pour surveiller les casques et aider les visiteurs à les mettre. Cependant, est-ce toujours nécessaire ?

La réalité virtuelle en visite libre

C'est une question que l'on se pose pour notre dispositif au palais de la découverte, chaque musée a mis en place différentes solutions pour résoudre cette problématique.

Tout d'abord en 2018, la Cité des sciences avait essayé de mettre en place deux sièges avec casque HTC Vive pour visualiser des films en 360°. Chaque casque était relié à un ordinateur sous le siège et les contenus étaient diffusés via un serveur en ligne. Mais cet essai ne fut pas concluant pour plusieurs raisons. Tout d'abord, une instabilité réseau entre les fauteuils et le serveur de contenus. Il y eu ensuite des problèmes de connectiques entre les PC qui étaient dans des boîtiers et les casques. Cela entraîna plusieurs pannes qui ont mis fin au projet.



Figure 20 Premier prototype pour la Cité des sciences

Nous avons la Bibliothèque Nationale de France (BNF) qui a installé dans la salle ovale une installation VR en visite libre pour afin de consulter des films en 360°. Je me suis donc rendu sur place pour essayer leur dispositif. Cette installation était composée de plusieurs éléments : un casque Pico G2 4K, un casque audio, un écran qui résumait les contenus disponibles sur le casque, des lingettes pour nettoyer le casque, une poubelle, une chaise et une page de mode d'emploi. On reviendra sur cette consigne qui va s'avérer très utile pour la conception de la nôtre. Pour ce qui est de l'expérience, nous pouvons sélectionner plusieurs films notamment d'Arte, et la sélection des contenus s'effectue avec la position de la tête. Le casque a une bonne qualité d'écran et confortable même s'il est compliqué d'ajuster les sangles pour notre tête. Le casque audio était agréable et permettait de nous isoler du reste de la salle mais il me semblait un peu fragile pour l'exploitation en exposition. Pour ce qui est de l'installation, le casque était attaché à la chaise avec un câble métallique (figure 21) mais il n'y avait pas de disposition pour masquer les boutons et les câbles. Ce qui peut poser un problème avec un public non averti. Le casque était aussi alimenté par une batterie portable qui était sécurisée sous le siège, cela implique une autonomie limitée et la nécessité au public d'éteindre et de rallumer le casque après chaque utilisation.



Figure 22 Installations général du dispositif de la BNF



Figure 21 Câbles apparent du dispositif



Figure 23 Ecran de visualisation des contenus

Ensuite nous avons rencontré l'entreprise « Memoikos » durant le Salon international des musées des lieux de culture et de tourisme (SITEM). Ils exposent le dispositif « Mira »[13] qui s'inspire des jumelles panoramiques pour le tourisme mais les jumelles sont remplacées par un casque de réalité virtuelle. Cette solution a comme avantage d'être résistante (même à l'extérieur) et autonome avec une maintenance peu fréquente. Mais nous nous sommes aperçus de certaines inadéquations avec notre besoin pour le dispositif du palais. Dans un premier temps ce dispositif ne fait que de la vidéo 360° qui, comme nous l'avons vu, offre peu d'interactivité. De plus, le casque compatible est un oculus go sortie en 2018 et qui n'a pas une excellente résolution. Enfin, le dispositif est assez massif et exclu les Personnes à Mobilité Réduite (PMR) ainsi qu'un certain nombre de public.



Figure 24 Dispositif Mira par Memoikos

Du 12 au 16 avril 2023, s'est tenu le salon de Laval Virtual, l'un des plus grands événements dédiés aux technologies immersives en Europe. Nous avons eu l'opportunité d'assister à ce salon et de rencontrer la société hollandaise « TitanSkin »[14], qui propose une solution innovante pour sécuriser et protéger les casques VR. Ce dispositif se compose de deux parties principales : une enveloppe métallique conçue pour éviter les dommages et les pressions accidentelles sur les boutons, ainsi qu'une poulie équipée d'un câble métallique. Cette poulie permet de suspendre le casque tout en maintenant le câble connecté en permanence. TitanSkin propose plusieurs modèles d'enveloppes métalliques adaptés à différents types de casques, ainsi qu'un modèle avec une potence permettant de suspendre le casque au mur (figure 25). Il est à noter que TitanSkin a déjà collaboré avec des musées pour des expériences de réalité virtuelle en visite libre lors d'expositions. Cela a été le cas notamment avec le Centre de phoques de Pieterburen, où une vidéo à 360 degrés sur les cris des bébés phoques a été présentée (figure 26) [15]. On peut aussi citer le Museum Ons' Lieve Heer op Solder qui a accueilli l'œuvre « See me, Hear me, Meet me », un film en 360° posant la question suivante : « Que signifie avoir 15 ans dans une société culturellement diversifiée ? » (figure 25) [16]. Ces musées ont utilisé le dispositif de TitanSkin



Figure 27 Solution de TitanSkin



Figure 26 Film 360 au Centre de phoques de Pieterburen



Figure 25 See me, Hear me, Meet me au Museum Ons' Lieve Heer op Solder

principalement pour la diffusion de vidéos sans interactions, mais il est important de noter que la technologie, telle que le suivi des mains offert par l'Oculus Quest 2, permet aux visiteurs d'interagir avec leur environnement. Ainsi, il est envisageable d'ajouter des fonctionnalités interactives à ces expériences.

III) L'Accessibilité

Définitions

Le mot « accessibilité » est entré dans le langage courant mais regroupe en réalité un certain nombre de concepts. Il y a un certain nombre de définitions différentes en fonction des pays et des scientifiques. Si on se réfère à la définition donnée par le gouvernement français [17] :

« Conception de produits, d'équipements, de programmes et de services nécessaires à toute personne en incapacité permanente ou temporaire pour se déplacer et accéder librement et en sécurité à son logement, ainsi qu'à tous les lieux public / activité. »

On voit que pour l'État cette définition de l'accessibilité est centrée sur l'interaction entre les personnes et leur environnement au sens géographique. Mais l'accessibilité est un concept plus large. Pour notre cas la définition [17] du Ministère de la Culture est plus pertinente :

« La réduction de la discordance entre, d'une part, les possibilités, les compétences et les capacités d'une personne et d'autre part les ressources de son environnement lui permettant de façon autonome de participer à la vie de la cité »

Le Ministère de la Culture précise cette définition avec plusieurs champs d'actions de l'accessibilité pour la culture :

- **Accessibilité des lieux** : cela reprend la première définition avec l'architecture du bâtiment et d'accueil du public.
- **Accessibilité des produits de l'industrie culturelle** : impliquant la scénographie, l'adaptation de l'offre culturelle, les dispositifs techniques et la médiation humaine.
- **Accessibilité de l'information** : avec l'adaptation des supports et type de communication pour convenir à la compréhension de chacun.
- **Accessibilité aux pratiques artistiques** : que ce soit dans un cadre professionnel ou de loisir.

Sur ces quatre axes, deux nous intéressent particulièrement : accessibilité des produits de l'industrie culturelle et accessibilité de l'information. Mais factuellement, comment designer un « produit » culturel et rendre les informations accessibles par le plus grand nombre ?

Il y a plusieurs approches pour concevoir une expérience :

La première méthode s'appuie sur les typologies d'handicap, c'est une manière de voir la conception d'accessibilité d'un point de vue médical. On va regrouper les personnes qui ont le « même » handicap et on va trouver des solutions communes. Cette méthode a comme principale faiblesse de traiter toutes les personnes d'un même handicap de la même manière alors que ce n'est pas forcément pertinent. Par exemple, les personnes qui ont un Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA) [18], n'ont pas toutes les mêmes capacités et les mêmes besoins. Il va donc en résulter des solutions de design différente pour chaque personne. De plus, dans cette méthode on va d'abord concevoir une expérience, ou un dispositif, puis l'adapter à certaines typologies d'handicap. Mais cette méthode permet, néanmoins, d'englober des solutions communes à un type d'handicap applicable sur plusieurs dispositifs (par exemple la Langue des Signes Française : LSF).

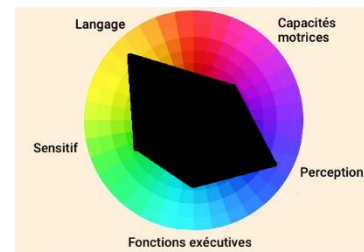


Figure 28 Représentation circulaire du spectre autistique

La deuxième approche part de la question suivante : et si, au lieu de regrouper les personnes en fonction de leur handicap, nous les regroupions en fonction de leurs besoins ? Plutôt que de créer une application rigide conçue pour être accessible à une seule typologie de handicap, essayons plutôt de développer une application fondée sur des fonctionnalités pouvant être utiles à diverses personnes, même si elles ne présentent pas le même handicap.

Pourquoi faire une distinction entre les personnes en situation de handicap et les autres ? Les fonctionnalités conçues pour répondre aux besoins spécifiques des personnes en situation de handicap peuvent également être utiles aux personnes sans handicap. Par exemple, une personne sans « handicap » qui tient un objet dans sa main droite pourrait trouver l'option « interagir sans main » tout aussi pratique qu'une personne tétraplégique. Accordons aux utilisateurs le pouvoir et le droit de créer l'expérience qu'ils souhaitent, à l'aide des outils que nous pouvons leur fournir. Il est néanmoins essentiel de mettre clairement en avant les options disponibles afin que chaque personne puisse savoir si le dispositif leur est accessible ou non.

Ce principe se rapproche de la philosophie de l' « Universal design » ou conception universelle qui est définie en 1993 par Ron Mace [19] :

« La conception universelle est la conception de produits et d'environnements utilisables par tous, dans toute la mesure du possible, sans qu'il soit nécessaire de les adapter » (Ron Mace, 1993, p.1)

Il détaille la conception universelle en sept principes essentiels [20] :

- 1) **Utilisation égalitaire** : Chaque utilisateur devrait être en mesure d'utiliser le produit, indépendamment de sa taille, de son âge ou de ses capacités, de manière non stigmatisante.

- 2) **Flexibilité d'utilisation** : Le produit peut être utilisé de différentes manières, il s'ajuste aux spécificités de l'utilisateur (par exemple, avec la main droite ou la main gauche ; en utilisant la voix plutôt que le toucher, etc.).
- 3) **Utilisation simple et intuitif** : Le produit peut être compris indépendamment des connaissances, de l'expérience, des capacités linguistiques ou de la concentration de l'utilisateur au moment de l'utilisation.
- 4) **Information perceptible** : Les informations essentielles à l'utilisation du produit sont fournies, incluant des adaptations pour les personnes déficientes visuelles, déficientes auditives, ou rencontrant des difficultés de lecture ou de compréhension. Les informations cruciales sont clairement mises en avant.
- 5) **Tolérance pour l'erreur** : Le produit réduit, au minimum, les risques de manipulations incorrectes et ne présente pas de danger en cas d'utilisation inappropriée. Il avertit l'utilisateur en cas d'erreur et offre la possibilité de revenir en arrière à tout moment.
- 6) **Effort physique minimal** : Le design peut être utilisé de manière efficace et confortable, et ce, avec un minimum de fatigue.
- 7) **Dimension et espace libre pour l'approche et l'utilisation** : Le produit est accessible facilement, peu importe la taille de l'utilisateur, ainsi que sa position assise ou debout, et celle de son aidant.

Créer une application universelle peut sembler illusoire, mais essayer de s'en rapprocher n'est pas une mauvaise chose. Les principes associés, à cette approche sont particulièrement pertinents, car ils fournissent des orientations qui auront un impact sur nos choix de conception pour l'expérience. En collaboration avec mon tuteur Jérôme Dupire, nous avons décidé d'adopter la méthode suivante : intégrer autant de fonctionnalités que possible dans l'expérience, tant que cela ne crée aucune gêne. Quant aux autres fonctionnalités, elles seront disponibles en option au début de l'expérience.

Accessibilité à Universciences

En 1992, après avoir entrepris, depuis son ouverture, une approche novatrice, et, forte de ses six années d'expérimentation pratique, la Cité des sciences et de l'industrie a émis un document intitulé « Des visites confortables pour tous ». Ce document permet de définir les normes d'accessibilité pour les personnes handicapées. Ce titre même reflétait l'engagement de la Cité envers la conception universelle, visant à intégrer dès le début, les besoins divers de tous les visiteurs et à permettre à chacun de profiter de toutes les adaptations, facilitant l'accès à son offre.

Depuis la parution de ce document, la Cité des sciences et de l'industrie a approfondi sa démarche jusqu'à obtenir le label « Tourisme et handicap » pour les quatre catégories de handicap le 3 mai 2001. Devenant ainsi le premier grand établissement culturel à recevoir cette reconnaissance. Depuis, la promulgation de la loi du 11 février 2005 sur l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées a légitimé l'approche expérimentale de la Cité, tout en fournissant un cadre législatif et réglementaire plus précis.

D'autre part, Universciences préside la Réunion des Établissements Culturels pour l'Accessibilité (RECA) qui est définie comme : « RECA conduit une réflexion au sein de différents groupes de travail et développe des actions concrètes inter-établissements qui ont abouti à des améliorations de tous ordres : architecturales, éditoriales, informatiques et techniques. ». De plus la Cité des science et de l'industrie on leur propres département traitant de l'accessibilité pour toute les exposition elle se nomme la DQUA (Département de la qualité d'usage et de l'accessibilité).

Accessibilité et VR

Les questions d'accessibilité appliquées à la réalité virtuelle sont relativement récentes, une étude menée par Zhao et al. auprès de développeurs Unity a révélé qu'aucun d'entre eux n'avait jamais pris en considération l'accessibilité. De plus, aucun d'entre eux n'avait reçu d'orientations de la part de son employeur concernant les directives d'accessibilité auxquelles leurs applications devraient adhérer [21]. Pourtant, il semblerait que la réalité virtuelle est particulièrement utile, à des fins de thérapeutique, pour l'autisme [22], la maladie de Parkinson [23] ou de la Rééducation sensorimotrice et cognitive [24]. Depuis quelques années, les chercheurs et les différents acteurs du milieu essayent d'instaurer des lignes de conduite ou guidelines d'accessibilités pour la réalité virtuelle. De la même manière que cela avait été fait pour les sites internet (avec par exemple la description des images dans le « alt-text »). L'article de Fiona Heilemann [25] regroupe et décrit les trois principales guidelines à appliquer au développement de jeu en réalité virtuelle :

L'« XR Accessibility User Requirements » [26] (XAUR) est un ensemble de directives publiées par le groupe de travail Accessible Platform Architectures (APA) du World Wide Web Consortium (W3C)[27] qui est un organisme de standardisations des technologies d'internet. Ces directives comprennent des définitions ainsi qu'une liste de dix-neuf besoins et exigences des utilisateurs pour que les applications XR soient accessibles.

Les « Virtual Reality Checks » [28] (VRC) du portail des développeurs d'Oculus, sont un ensemble de directives que les développeurs doivent respecter pour publier leurs applications sur les dispositifs Oculus. Récemment (en 2021) les VRC ont été étendus par l'ajout de la section « Exigences en matière d'accessibilité », offrant des recommandations visant à accroître l'accessibilité des applications de réalité virtuelle.

Les « Game Accessibility Guidelines » (GAG) [29] ont été élaborées en 2012 et demeurent les directives les plus reconnues et détaillées pour les jeux. Elles reposent sur le WCAG 2.0 et les normes internes de la British Broadcasting Corporation (BBC) [30]. Ces règles font l'objet

d'une mise à jour constante pour chaque directive. Les GAG fournissent des exemples de jeux qui ont mis en œuvre la règle et répertorient des outils utiles à cet effet.

Nous allons diviser les fonctionnalités pertinentes pour notre expérience en deux catégories. La première étant les interactions que le joueur envoie au dispositif VR, en d'autres termes les informations données « physiquement » par le joueur (par exemple la voix, les gestes...) Et la seconde, les informations transmises du dispositif VR au joueur, en d'autres termes ce que le joueur va recevoir (par exemple auditif, visuel...).

Types d'interactions physique

En proposant aux utilisateurs une diversité de types d'interactions, il est possible d'adapter le dispositif à leurs besoins tout en facilitant l'accès à des expériences plus inclusives. Dans un premier temps, voici quelques exemples interactions "physique" possibles :

L'interaction avec la voix, permet aux utilisateurs d'interagir avec l'environnement VR principalement au moyen de commandes vocales. Des directives telles que « avancer » ou « sélectionner l'objet » peuvent être énoncées. Cette fonctionnalité est réalisable avec le « Oculus Voice SDK » [31] en partenariat avec « Wit.ai » [32] qui possède une haute qualité avec l'anglais et douze autres langues en développement. Cela pourrait fonctionner correctement avec une application personnelle. Mais avec ce type d'interaction, notre principale problématique est le bruit ambiant qu'il y a dans un musée. Le son des visiteurs qui discutent, le son des autres îlots ou encore les autres personnes autour de nous qui font la même expérience peuvent déclencher, sans le vouloir, des actions dans notre expérience.

L'interaction avec des boutons ou un clavier permet aux utilisateurs d'utiliser les touches fléchées pour les déplacements et d'autres touches pour les interactions et les commandes. Dans la plupart des cas, ce type d'interaction s'effectue avec des manettes qui varient selon les fabricants. Les manettes d'Oculus (figure 30), par exemple, sont composées de deux boutons, d'un joystick et de deux gâchettes par manette, et les boutons peuvent être reconfigurés pour changer leur action dans l'application. Les manettes de Steam, les « knuckle » (figure 31), permettent de ne pas constamment tenir la manette ; de plus, elles intègrent un capteur de présence et de pression en fonction des doigts, facilitant ainsi l'accès aux boutons. D'autres manettes, plus traditionnellement utilisées sur PC ou consoles peuvent être utilisées pour certains jeux. On pense notamment au PSVR2 qui peut être associé avec les manettes « Access » de Sony (figure 29). Les joysticks et chaque bouton sont remplaçables et interchangeables et il est possible de brancher d'autres périphériques tels que des boutons plus volumineux ou un deuxième joystick. Cependant, cette approche se limite aux jeux où on ne se déplace pas physiquement dans l'environnement, comme c'est le cas pour des jeux tels que « Star Wars: Squadron » ou « Gran Turismo ». Pour notre expérience, les manettes semblent constituer une solution complexe en raison de

contraintes opérationnelles, de personnalisation et de modularité qui peuvent être difficiles à maintenir pour chaque utilisateur.



Figure 29 Manette Access de Sony



Figure 30 Manette de l'Oculus Quest 2

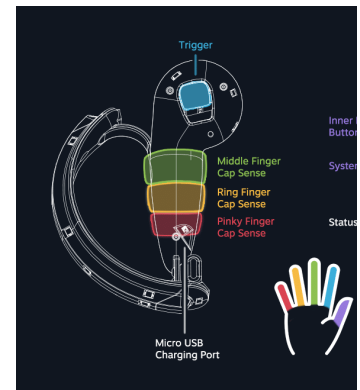


Figure 31 Manette Knuckle de Steam

Interagir avec des gestes implique que les utilisateurs effectuent des gestes manuels ou corporels pour naviguer et interagir. Par exemple, agiter la main pour se déplacer, pointer pour sélectionner des objets ou réaliser des gestes spécifiques pour des commandes. Cette fonctionnalité est rendue possible grâce à la technologie du « Hand tracking », qui permet de reconnaître la position des mains et des doigts dans l'espace. Cette technologie est directement intégrée dans certains casques tels que l'Oculus Quest 2 ou le Vive Focus 3, mais elle peut également être ajoutée avec un Leap Motion sur des casques non compatibles. De plus, des gestes avec les mouvements de la tête peuvent être utilisés, notamment pour dire « oui » ou « non ». Cette solution semble pertinente car elle n'exige pas l'utilisation de manettes et peut être plus universelle. La prise en main est simplifiée en s'appuyant sur nos expériences quotidiennes, par exemple en fermant la main pour attraper un objet. Cependant, le principal obstacle de cette technologie est la perte des sensations haptiques, telles que les vibrations, ce qui peut poser un problème pour les personnes pour qui ce sens est important.

Interagir avec le regard ou la tête consiste à fixer le regard sur un objet pour le sélectionner ou à orienter la tête dans une direction pour la navigation et le parcours des menus. Certains casques, tels que le HTC Vive Pro Eye et le Focus 3 Eye Tracker, intègrent la technologie « eye tracking », qui permet de récupérer la position des yeux et d'en déduire ce que l'utilisateur regarde. Cette technologie simplifie également des actions telles que « le lancer » en ajustant la trajectoire d'un objet par rapport à la cible observée par l'utilisateur. Cependant, le principal inconvénient du « eye tracking » réside dans la nécessité de calibrer l'appareil pour chaque nouvel utilisateur, ce qui peut être gênant dans le cadre d'une exploitation dans un contexte de musée et donc faire face à une grande diversité de public. En comparaison, le réglage n'est pas nécessaire avec le « head tracking », qui suit la position et l'orientation de la tête grâce au casque. Il est important de noter que bien que le « head tracking » soit moins précis que le « eye tracking », la tête doit être alignée avec l'objet pour interagir. Dans

notre cas, nous envisageons probablement d'utiliser le « head tracking » plutôt que le « eye tracking », car le prototype sera programmé pour l'Oculus Quest 2, qui ne dispose pas de la technologie « eye tracking ».

Type d'informations de sortie

Voici une liste de sorties qui peuvent être disponibles pour un utilisateur afin de l'aider à comprendre, interagir et ressentir les retours d'une application de réalité mixte (XR).

Visuel - Il s'agit d'utiliser le sens de la vue, notamment à travers des graphiques en 2D et 3D. La vue est le sens le plus sollicité, mais nous ne sommes pas tous égaux quant à ce que nous pouvons voir ou non. Pour atténuer ces différences, il existe notamment SeeingVR, un ensemble de 14 outils qui améliorent une application de réalité virtuelle (VR) pour les personnes ayant une déficience visuelle, en fournissant des augmentations visuelles et auditives. Un utilisateur peut sélectionner, ajuster et combiner différents outils en fonction de ses préférences. Neuf de ces outils modifient une application VR existante a posteriori via un plugin, sans nécessiter d'effort de la part des développeurs. Les autres nécessitent des entrées simples de la part des développeurs à l'aide d'un package Unity, permettant l'intégration des 14 outils de soutien visuel au cours du développement.

Auditif - Une des composantes fondamentales pour le son en réalité virtuelle est la spatialisation sonore. Les moteurs de sons sont assez limités dans la spatialisation et ils ne sont pas spécialement conçus pour la VR. C'est pour cela que nous pouvons intégrer un 3D audio plug-in qui offre une meilleure qualité et des fonctionnalités particulières pour la réalité virtuelle s'appuyant sur le head tracking. En effet, puisque nous disposons de la position de la tête de l'utilisateur, les plug-ins utilisent HRTF (head-related transfer function) pour spatialiser le son. Nous sommes capables d'identifier l'emplacement d'une source sonore à l'aide des signaux binauraux, tels que la différence de temps et d'intensité avec laquelle un son atteint nos tympans, appelés respectivement Différence de Temps Interaurale (ITD) et Différence d'Intensité Interaurale (IID). La position du son est aussi déterminée par des paramètres de morphologie, les ondes sonores reçues par l'oreille sont diffractées, reflétées et atténuées par la forme du pavillon de l'oreille et de l'oreille externe ou encore de l'aspect de la tête. L'HRTF prend en référence la position de la tête dans le monde virtuel pour en déduire ces altérations, ainsi il peut simuler un son comme s'il émanait d'une source placée dans une position virtuelle 3D, à un azimuth (θ), une élévation (Φ) et une distance (r) souhaitée. Pour intégrer cette spatialisation dans un moteur de jeu, il nous faudra utiliser des plug-ins 3D qui utiliseront cette fonction HRTF. Les plugins les plus utilisées sont Steam VR audio, Oculus Audio Sdk et Resonance de Google que je vais utiliser avec le moteur de son Fmod.

Tactile - il s'agit d'utiliser le sens du toucher, communément appelé haptique. Dans plusieurs domaines tels que la téléopération, la télé médecine et la télérobotique, le sens du toucher

est nécessaire pour mieux appréhender le monde virtuel. De plus, la main possède une densité élevée de capteurs tactiles, ce qui en fait un bon candidat pour l'immersion, et elle est naturellement utilisée pour les tâches de manipulation. Les interfaces tactiles ont été classées en deux catégories : les interfaces de rétroaction thermique et les interfaces de rétroaction tactile. Effectivement, on peut envisager l'utilisation de vibrations au niveau des manettes, de gants spécialisés, ou même de bras à retour d'effort pour fournir une rétroaction tactile.

Partie 2 : Expérimentations

I) Définitions du projet

Objectif du prototype

Le prototype a plusieurs objectifs. Dans un premier temps, il vise à observer l'intérêt des visiteurs à s'immerger dans la réalité virtuelle dans un musée. Il s'agit de déterminer si les personnes sont disposées à expérimenter la VR. De plus, le prototype vise à tester l'ergonomie et la robustesse de l'équipement. Il s'interroge sur la manière d'adapter l'outil et le matériel de réalité virtuelle pour faire face à une forte affluence, liée au statut de musée, tout en offrant une expérience utilisateur agréable. Enfin, il pose la question de l'accessibilité d'un tel dispositif de médiation, en se demandant comment rendre cette expérience accessible au plus grand nombre. De plus il n'y a pas d'accompagnement humain affecté au dispositif.

A ce stade, voici les différentes problématiques :

- Quelles sont les fonctionnalités à intégrer pour créer une expérience de VR accessible ?
- Peut-on proposer au public un ou des casques VR en visite libre ?
- Le matériel est-il assez solide pour être proposé au public en visite libre ?
- Les visiteurs comprennent-il comment mettre le casque et quelles informations sont nécessaires ?
- La prise en main du hand tracking est-elle naturelle et quelles informations sont nécessaires ?
- La maintenance, allumage et mise à jour des casques est-elle viable pour une exploitation muséale ?

Description du matériel et des outils utilisés

Pour le casque de réalité virtuelle à six degrés de liberté nous avons choisi l'Oculus Quest 2 [33] de l'entreprise Méta. Ce casque fonctionne sans avoir besoin d'ordinateur. Il a une résolution par œil 1834 x 1920, un taux de rafraîchissement entre 60 et 90 Hz, ce qui est une qualité satisfaisante pour l'expérience souhaitée. Il possède aussi des petits haut-parleurs directement intégrés dans le casque, donc un casque audio n'est pas forcément nécessaire. En termes de fonctionnalité, il inclut, le passthrough et le hand tracking indispensable pour l'expérience. Nous ne souhaitons pas avoir de manette pour cette expérience car elle rajoute de la complexité en termes d'accessibilité et de maintenance. Pour le confort d'utilisation, le casque permet d'être compatible avec le port des lunettes, mais nous avons dû changer la

sangle d'origine pour la remplacer par une sangle « Élite » (figure 32). En effet, cette sangle est plus simple à mettre, plus solide et stabilise le poids du casque.



Figure 32 Sangle Élite de l'Oculus Quest 2

Pour l'accroche et la sécurisation du casque, nous avons choisi la solution de TitanSkin précisée plus haut. Nous leur avons commandé deux poulies, deux potences et deux protections de métal ainsi que deux câbles USB-C Oculus de cinq mètres. Nous avons aussi fait le choix de prendre l'intégralité du matériel en deux exemplaires pour avoir une sécurité et pour le remplacer s'il est endommagé. Ensuite, il nous faudra aussi un siège stable et déplaçable pour les personnes à mobilité réduite, qui devra obligatoirement être sans accoudoir pour ne pas gêner la manipulation. Enfin, pour les consignes, nous aurons besoin d'un écran ou d'un panneau graphique.

Pour l'aspect développement de l'expérience, il y a plusieurs possibilités de moteurs de jeux : les plus connus sont Unreal Engine et Unity. Pour notre prototype, nous allons utiliser *Unity 2021.3*. Nous allons utiliser ce moteur pour deux raisons, la première étant mon expérience sur ce logiciel et la seconde étant qu'il offre un accès à un grand nombre de plugin pour la réalité virtuelle. Le plugin principal que nous allons utiliser est « *Oculus Intégration* » version 3.2.3 qui est directement développé par *Meta*. Il est le plugin le plus efficace pour le développement sur *Quest 2* avec notamment les fonctionnalités d'hand tracking et le passthrough.

Pour l'administration du casque j'ai utilisé *ArborXR* qui permet notamment de configurer le casque en mode *Kiosk*. Le mode kiosk permet de démarrer le casque directement sur une application définie, il bloque les menus à l'utilisateur qui ne peut interagir que dans l'expérience. *ArborXR* permet de voir l'état du casque, de les allumer et de les éteindre à distance. De plus, les mises à jour peuvent être déployées en ligne et programmées à des heures précises, par exemple durant les périodes de fermeture.

Lieu d'exposition

Il y a eu plusieurs options de lieux d'installations dans la Cité des sciences et de l'industrie envisagé pour accueillir le prototype. Le lieu devait respecter plusieurs critères : il doit être visible du public, on doit pouvoir accrocher le casque à un mur ou une structure mais aussi nous permettre de pouvoir observer les visiteurs sans les influencer.

Le premier lieu envisagé pour l'installation du prototype était *explora* (figure 33) qui est le premier étage de la Cité des sciences. L'installation devait s'inspirer d'un autre prototype de l'entreprise : *Mentalista* en partenariat avec la Universciences, qui a pour objectif de proposer un dispositif muséographique exploitant l'activité cérébrale des visiteurs (figure 34). Ce prototype était composé d'une structure en bois avec un compartiment sécurisé pour les ordinateurs, d'un siège et deux écrans verticaux. Pour énoncer les consignes il y avait un écran expliquant le processus et le cadre de cette recherche ainsi qu'un panneau graphique donnant des informations graphiques sur la prise en main du dispositif. Cet emplacement a comme principale qualité d'être le lieu le plus fréquenté de la Cité des sciences.

C'est aussi un inconvénient car nous n'avons qu'un casque pour ce prototype, il risque d'y avoir une file d'attente pouvant perturber la circulation entre les expositions. Une structure entière doit être conçue, construite pour l'occasion et le fait que le casque de VR sera suspendu en porte-à-faux. Ce qui implique le fait de réfléchir à des questions de sécurité. Par exemple : Une potence peut-elle supporter le poids personne si elle se suspend à celle-ci. De plus, en réalité nous ne voyons pas notre environnement et même si l'expérience se déroule assis, certaines personnes peuvent se lever et donc percuter ou blesser des visiteurs.



Figure 34 Installation de *Mentalista*



Figure 33 *Explora*

Nous avons donc décidé de nous installer au carrefour numérique² situé au -1 de la Cité des sciences et de l'industrie, qui est un espace collaboratif dédié au numérique et à l'expérience utilisateur. Ce lieu offre de nombreuses médiations sur différents sujets, il est composé de deux laboratoires : Le Fab Lab et le Living Lab. Fab Lab est un atelier partagé de conception et de fabrication, libre, gratuit et ouvert à tous. Le Living Lab est un laboratoire de la médiation numérique, dans le domaine de l'éducation et la culture. Le carrefour numérique accueille différents projets en développements avec des chercheurs, artistes, entreprises pour leur permettre de co-concevoir avec le public, ce qui nous a semblé tout à propos pour notre projet. De plus, le carrefour dispose d'une équipe de médiation dont Justine Gasc spécialisée en technologie XR et anime des ateliers avec des casques de réalité virtuelle. Elle nous sera d'une grande aide en nous informant des problèmes du casque et en nous conseillant pour les cartels d'utilisation et d'explications. C'est donc avec cette collaboration entre le carrefour numérique et l'équipe du palais, que nous avons pu installer le prototype dans la galerie du carrefour numérique qui est le lieu le plus fréquenté. Pour la potence, les mêmes questions se posent que pour le premier lieu mais avec l'aide du designer, Donatien Lenoir, nous avons réussi à faire installer une potence en métal sur la structure métallique du carrefour numérique qui est modulable. Nous avons récupéré aussi une assise qui permettait d'être stable et accueillante pour tous les visiteurs (figure 35).



Figure 35 Installation de la première itération au Carrefour Numérique

Consignes

Pour les consignes d'utilisation, nous avons pris exemple sur l'expérience de la BNF. Le mode d'emploi était écrit sur une page A4 avec 7 étapes, 3 mises en garde ne comportant qu'une seule image qui décrit l'emplacement et l'utilité des boutons. Nous allons suivre ces indications pour décrypter les étapes importantes à renseigner et décoder ce qui est améliorable :



Figure 36 Consigne de la BNF

Etape 1

Résumer de la consigne : Allumer le casque en appuyant sur un bouton et en attendant pendant 15 secondes. Puis brancher le casque audio sur la prise jack.

Observation : L'application se démarre automatiquement mais

Etape 2

Résumer de la consigne : Enfilez le casque et ajuster le casque a votre tête à l'aide des sangles sur les côtés.

Observation : Le casque possède des sangles élastiques, ce qui peut le rendre moins facile à mettre.

Etape 3

Résumer de la consigne : Pour visionner un film 360° sélectionnez avec le point blanc : mettez le point blanc sur OK et attendez. Vous pouvez arrêter le film en appuyant avec le même principe sur « Menu » vous pouvez arrêter le film.

Observation : Cela fonctionne plutôt bien, les retours sont assez compréhensibles. Je ne suis pas sûr d'avoir besoin d'une consigne pour cela.

Etape 4

Résumer de la consigne : on nous explique comment améliorer nos conditions de visionnage. Par exemple, pour les personnes avec des lunettes en mettant l'avant du masque sur leur visage par-dessus les lunettes, et passez la sangle derrière la tête.

Observation : Je trouve que la compréhension n'est pas très claire, et un schéma serait plus explicite.

Les deux dernières étapes servent principalement aux personnes qui font l'entretien du casque. L'étape 5 nous explique que le casque a une autonomie de 2 heures et qu'il faut le recharger pendant 2 heures et l'étape 6 nous explique comment éteindre le casque. Pour l'entretien, il est noté que le casque doit être nettoyé après chaque utilisation.

La consigne mentionne que le casque est déconseillé pour les enfants de moins de 13 ans ainsi qu'aux femmes enceintes et aux personnes souffrant de troubles sensibles ou physiques tels que les troubles cardiaques, l'épilepsie, l'hypertension, le vertige, ou le mal des transports. Bien que je n'aie pas trouvé de références spécifiques pour les personnes atteintes de troubles sensibles ou physiques ainsi que pour les femmes enceintes, il est généralement reconnu que les enfants sont particulièrement vulnérables sur le plan

ophtalmologique. L'utilisation de casques de réalité virtuelle présente des risques significatifs pour les enfants, étant donné que leur système oculaire est en constante évolution jusqu'à l'âge de 12 ans [34]. Par conséquent, il est fortement déconseillé d'utiliser ces dispositifs, en particulier chez les enfants de moins de 6 ans. Même au-delà de cet âge, il est recommandé de limiter leur utilisation jusqu'à l'âge de 13 ans [35]. Outre le risque de retard de développement du système visuel, les enfants s'exposent à des maux de tête et à une fatigue visuelle non négligeables. Il est important de souligner ces avertissements pour sensibiliser les utilisateurs potentiels aux risques associés à l'utilisation du casque de réalité virtuelle, en particulier lorsqu'il s'agit de populations spécifiques telles que les enfants et les personnes ayant des conditions de santé particulières.

C'est en tenant compte de ses recommandations que nous avons créé nos premières consignes, composées de deux pages. La première page (figure 38) était constituée du titre de l'expérience "Le comportement de l'eau à l'échelle du millimètre", d'un texte de contenu, de la durée de l'expérience et d'une mention déconseillant l'utilisation pour les moins de 13 ans. La deuxième page (figure 39) était un mode d'emploi détaillant comment mettre le casque en 3 étapes. Les deux pages étaient imprimées au format A4 et disposées sur un écriteau (figure 39).



Figure 38 Première page sur le contenu de la première itération



Figure 39 Deuxième page sur le mode d'emploi pour première itérations



Figure 37 Installations des cartels sur l'écriteau

Personnes impliquées dans le projet

Supervision :

Anne P. (DET), Stéphanie O. (ICPM), Thierry J. (CPM), Isabelle T. (coordination Palais),
Géraldine Delaforge (DQUA), Fabien Boyer (Carrefour numérique)

Conception : Alexis Amen, Paul Viudes

Suivi scientifique : Jean Michel Courty, Vincent Blech

Production du logiciel :

- Graphisme, modélisation 3D : Thimothée Auvray, Paul Viudes
- Programmation, Intégration dans les casques : Paul V.
- Ecriture des textes : Vincent Blech, Paul Viudes
- Enregistrement des voix : Paul Viudes, Alexis Amen

Production des éléments de muséographie associés :

- Ecriture des textes cartel : Vincent Blech, Alexis Amen
- Mise en page graphique et impression : Alexis Amen et Coralie Rotureau
- Achat potence et support casque : Thierry Jori, Philippe Herpin

Installation :

- Choix d'un lieu au carrefour numérique : équipe carrefour + ICPM
- Installation des potences : à définir
- Installation des autres éléments : Paul Viudes, Alexis Amen

Accessibilité : Paul Viudes, Jérôme Dupire (Tuteur académique), Camille Rage

Etude, retour d'expérience :

- Paul Viudes, Alexis Amen
- Indivisible

II) Phase de conception

Conception du scénario du multimédia

Nous avons donc écrit une première version du scénario que voici :

Intro :

- 1) Le visiteur voit un casque de réalité virtuelle suspendu au-dessus d'un fauteuil, avec autour des éléments graphiques délivrant du contenu et des explications sur la manière de mettre un casque. (NB : plusieurs casques pourraient être installés si le matériel est disponible).
- 2) Il s'assoit et met le casque de réalité virtuelle, et peut voir le monde qui l'entoure en transparence (passthrough).
- 3) Il y a une table virtuelle devant lui avec un ou plusieurs boutons d'après les modes de consultation disponibles (voir phases de test ci-après) :
 - a. Démarrez l'expérience (seulement français disponible)
 - b. Français / Déficient Visuel
 - c. Français / Déficient Visuel / Déficient Auditif

Echelle du Mètre (monde actuel) :

- 4) La voix d'un scientifique l'accueille, lui explique qu'il prépare une grande expédition à travers les différentes échelles de l'univers afin d'observer le comportement de la matière ainsi que les forces qui sont à l'œuvre. En effet, nous sommes au quotidien constamment entouré de forces qui agissent sur notre corps et nous contraignent dans nos déplacements dans le monde. Nous devons, sans nous en rendre compte, composer avec les contraintes pour adopter un déplacement fluide. Pour sa première expédition, il propose au visiteur d'aller observer l'échelle du millimètre.
- 5) Le scientifique précise que l'explorateur va concentrer son attention sur le comportement de l'eau et sur la manière dont la gravité et la viscosité la modifient. Des brumisateurs s'activent tout seuls (une action visiteur suit juste après) et dispersent des milliers de petites gouttes d'eau de tailles variées ce qui permettra de les observer à différentes échelles.
- 6) Le scientifique explique qu'il l'accompagnera tout au long de cette expédition et lui demande de lever le pouce s'il est prêt à commencer la descente.

- 7) Le visiteur commence alors à rétrécir. Une animation fait disparaître le monde réel (passthrough) et le place devant une scène virtuelle composée d'objets de références qui vont permettre au visiteur de suivre son rétrécissement. Les textures des objets virtuels devront être de bonne définition pour qu'une fois le visiteur rétréci, il puisse voir la granularité des matières (figure 2).

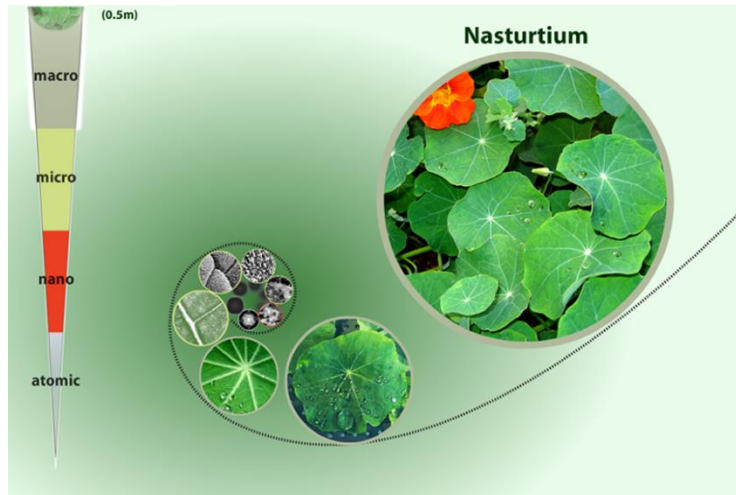


Figure 40 Exemple de granularité des objets

Échelle du Millimètre :

- 8) À cette échelle, le visiteur découvre devant lui (à quelques mètres virtuels) une goutte d'eau parfaitement sphérique sur le sol.
- 9) Le scientifique lui explique que ce qui maintient la goutte d'eau sous forme de sphère, c'est la force de cohésion qui attire ces molécules vers le centre.
- 10) Ensuite, il invite le visiteur à ramasser les petites gouttes au sol autour de lui et à les lancer pour faire grossir la plus grosse goutte.
- 11) Pendant qu'on lance les gouttes, le scientifique nous explique que les petites gouttes qu'il envoie, suivent un mouvement balistique, similaire à celui d'une balle. Mais avec un mouvement légèrement chaotique dû à la viscosité des mouvements de l'air.
- 12) Quand le joueur réussit à viser la grosse goutte, celle-ci s'affaisse légèrement : la sphère devient une ellipsoïde de plus en plus plate. Le scientifique explique petit à petit que c'est en raison de la gravité que la goutte qui s'élargit en s'aplatissant progressivement, jusqu'à se transformer en une petite flaque. (Les forces sont montrées par des flèches autour de l'objet).
- 13) Si le visiteur réussit à plusieurs reprises à atteindre la goutte, elle finit par se transformer en une flaque. Si le joueur a des difficultés, au bout d'un certain temps une goutte va tomber du ciel et faire grossir la goutte pour qu'elle éclate. (Scénario précis à finaliser en testant).

Conclusion :

- 14) Le scientifique félicite le visiteur et le remercie d'avoir participé à cette expérience. Il lui rappelle qu'il reste encore de nombreuses échelles à explorer, et espère pouvoir lui proposer cette balade dimensionnelle très bientôt à la Cité ou au Palais de la découverte.

Organisation

Afin de tester le prototype, plusieurs phases sont prévues : dans un premier temps, je vais le développer en co-conception avec Camille Rage du département accessibilité (DQUA) de la cité, ainsi que mon tuteur Jérôme Dupire. L'objectif est de concevoir l'accessibilité dès le début du développement. À partir du vendredi 20 octobre, juste avant les vacances de la Toussaint, nous allons installer le prototype pour qu'il fonctionne pendant une période de forte affluence. Pendant ces vacances scolaires, nous observerons, améliorerons et corrigerons les problèmes éventuels pouvant survenir sur le prototype.

Le 31 octobre, 3 novembre et jeudi 9 novembre, l'agence de conseil et d'étude "Indivisible" effectuera des observations pour déterminer l'autonomie des utilisateurs. Du 31 octobre au 3 novembre, j'aurai un stand à la Paris Games Week (PGW) avec Cap Games, une association qui œuvre pour améliorer l'accessibilité aux jeux vidéo et dont Jérôme Dupire est le co-fondateur. Pendant la PGW, j'animerai un stand où les personnes testeront le prototype et répondront à un questionnaire centré sur l'accessibilité. Étant sur le stand de Cap Games, l'objectif est d'atteindre un public aussi diversifié que possible. Le 7 novembre, avec la DQUA, nous organiserons une session de test avec des personnes en situation de handicap pour recueillir leurs remarques sur l'expérience et leurs idées d'amélioration.

III) Première Itération

L'objectif premier était de créer une première version est d'avoir squelette où on peut jouer l'expérience de bout en bout. Pour cela, le joueur devra avoir la possibilité :

- D'attraper des objets avec ses mains.
- De lancer des objets avec ses mains.
- De rétrécir jusqu'à la taille du millimètre.
- De déclencher un évènement quand il fait un signe spécifique avec la main.
- De passer du mode passthrough au mode virtuel.
- D'avoir plusieurs canaux sensoriels de compréhension du propos scientifique de l'expérience.
- De participer à l'expérience du début à la fin.

Développement des interactions

Au début du développement, j'ai commencé par intégrer le hand tracking. Cela s'est avéré relativement simple grâce au plugin Oculus Intégrations, qui met à disposition des scènes d'exemples telles que la possibilité d'appuyer sur des boutons ou d'attraper des objets. Dans ce plugin, nous avons également la possibilité d'associer un geste de la main, par exemple le pouce levé, à une action en jeu. J'ai pensé que le pouce levé pourrait être un bon déclencheur pour le rétrécissement. Cependant, il convient de noter que le rétrécissement n'est pas vraiment un rétrécissement au sens strict, car réduire la taille du joueur n'est pas toujours une bonne idée en raison des limitations de la caméra (Clipping planes Near : distance minimale de la caméra). J'ai donc préféré agrandir tout l'environnement de manière progressive en fonction du temps (Lerp ou interpolation linéaire). Après quelques ajustements, une décroissance sur une période de cinq secondes semblait satisfaisante sans provoquer de malaise.

Pour rendre compte de ce changement de taille, j'ai d'abord effectué des tests avec des sphères de différentes tailles (figure 42). L'effet fonctionnait, mais il n'était pas optimal. En ajoutant des références tangibles tels qu'un arbre, une table, une petite araignée et un orque, l'effet a considérablement amélioré son rendu (figure 41).

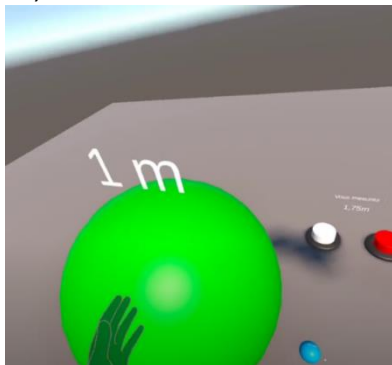


Figure 42 Test avec les différentes tailles de sphères

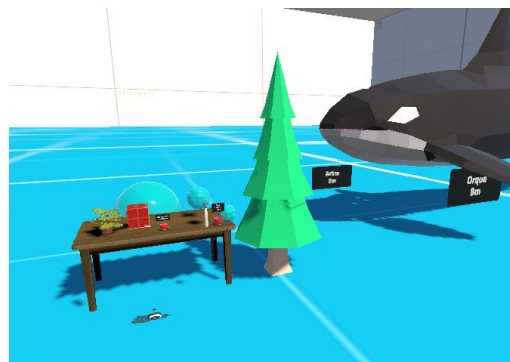


Figure 41 Test avec ajouts de références

L'interaction la plus complexe à régler a été l'étape du lancer de gouttes d'eau, en raison de plusieurs raisons. Tout d'abord, l'utilisation du hand tracking signifie l'absence d'accéléromètre, comme dans les manettes. Cela rend difficile la détermination précise de la vitesse de la main, car son calcul nécessite des interpolations entre sa position en fonction du temps. De plus, il a fallu trouver les masses idéales pour que les objets réagissent correctement lorsqu'on les lance, ni trop légers ni trop lourds.

Une difficulté supplémentaire lors du développement du hand tracking pour le Quest 2 est que nous sommes obligés de compiler l'application puis de la déployer sur le casque. En d'autres termes, il n'est pas possible de tester directement sur le PC, et chaque modification nécessite une recompilation. Les dernières fonctionnalités implémentées ont été la scène d'accueil en passthrough ainsi que des fonctionnalités d'exploitation. La scène du menu était composée d'une simple table avec un bouton rouge (figure 43) sur lequel il fallait appuyer pour démarrer l'expérience. Le monde réel s'estompait progressivement pour laisser place au laboratoire du monde virtuel.

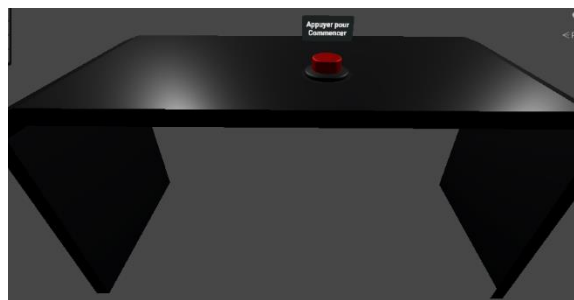


Figure 43 Menu basique

Les fonctionnalités d'exploitation comprenaient, par exemple, le fait que si une personne enlevait le casque avant la fin de l'expérience, elle devait recommencer. C'est à ce moment-là que j'ai également intégré la récupération des données du casque par sessions. En effet, j'ai développé un système permettant de récupérer les données suivantes dans un fichier JSON : le temps total de l'expérience, la date, le type d'interaction utilisé, le temps entre chaque étape, si la personne a abandonné ou non, et enfin le nombre total de participants (figure 44).

Name	Value.date	Value.controle	Colonne1	Value.totalTime	Value.SprayTime	Value.ThumbTime	Value.ThrowTime	Value.surrend
playerList 2023/10/23 16:09:51	Hand	25,92 s		25,92	7,00	0	0	true
playerList 2023/10/23 16:47:57	Hand	43,74 s		43,74	4,11	0	0	true
playerList 2023/10/24 15:16:48	Hand	44,12 s		44,12	0,88	0	0	true
playerList 2023/10/25 12:28:00	Hand	44,17 s		44,17	0,74	0	0	true
playerList 2023/10/25 12:37:20	Hand	1 min 12		72,01	15,19	0	0	true
playerList 2023/10/23 16:35:23	Hand	1 min 13,8		74,09	11,05	0	0	true
playerList 2023/10/24 12:04:43	Hand	1 min 34,8		94,87	17,04	0,7378998	0	true
playerList 2023/10/25 12:29:37	Hand	1 min 36,6		96,35	12,18	0	0	true
playerList 2023/10/24 15:50:28	Hand	1 min 41,4		101,19	25,33	0	0	true
playerList 2023/10/25 17:46:32	Hand	1 min 43,8		103,79	47,39	0	0	true
playerList 2023/10/25 16:36:25	Hand	1 min 43,8		104,05	6,65	0	0	true
playerList 2023/10/25 17:32:21	Hand	1 min 54,6		114,74	6,83	1,98584	0	true
playerList 2023/10/24 18:33:20	Hand	1 min 58,8		118,96	23,80	0	0	true
playerList 2023/10/25 15:09:40	Hand	2 min 9		128,78	49,53	0	0	true
playerList 2023/10/25 15:09:41	Hand	2 min 9		128,80	49,53	0	0	true
playerList 2023/10/25 17:24:31	Hand	2 min 12,6		132,34	48,56	0	0	true
playerList 2023/10/25 13:26:52	Hand	2 min 15		135,11	28,36	0	0	true
playerList 2023/10/25 17:06:23	Hand	2 min 27,6		147,56	72,83	0	0	true
playerList 2023/10/25 17:06:35	Hand	2 min 27,6		147,58	72,83	0	0	true
playerList 2023/10/24 16:35:02	Hand	2 min 28,8		148,59	11,50	0	0	true

Figure 44 Tableau Excel une fois les données extraites du JSON

Pour le moment, notre expérience ne dispose pas encore d'un environnement réellement cohérent, et comme nous l'avons souligné précédemment, plus nous avons de repères d'échelle, plus l'effet de rétrécissement sera efficace. En raison des contraintes de délais, je n'avais pas le temps de modéliser un environnement complet. Par conséquent, j'ai récupéré le modèle de laboratoire de Yahor Yurkavets [36] sur le site Sketchfab (en Creative Commons CC BY 4.0 DEED[37]). Après quelques modifications pour l'adapter à notre expérience, le modèle était exploitable.

Ensuite, j'ai dû créer un shader⁹ pour donner l'impression que l'eau bouge (voir figure 45), avec la possibilité de changer la couleur, la transparence et l'agitation de l'eau. Par la suite, j'ai animé cette sphère d'eau pour qu'elle s'étale. Cependant, une sphère pose un problème : elle conserve toujours la même hauteur de 3 mm en gardant le même angle par rapport au sol sur les côtés (voir figure 46). Je n'ai donc pas pu modifier simplement la taille, ce qui a donné le résultat à gauche sur la figure 47. Pour obtenir le résultat souhaité, j'ai dû créer une animation qui modifie la géométrie dans Blender, puis l'exporter dans Unity, ce qui a donné le résultat à droite sur la figure 47.

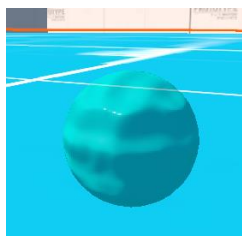


Figure 46 Shader d'eau



Figure 47 Schémas d'explications

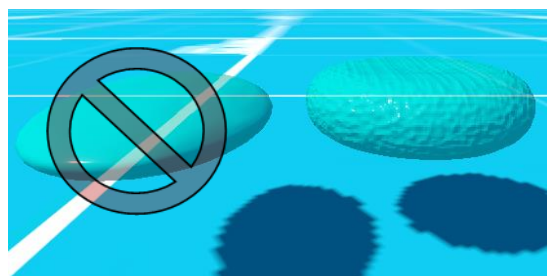


Figure 45 Sans et avec modification de la géométrie

Suivant les conseils en matière d'accessibilité, j'ai également intégré des contours lumineux autour des objets importants avec lesquels interagir (figure 48). Je leur ai attribués une couleur jaune et la possibilité de s'épaissir et de se désépaissir pour attirer davantage l'attention.

L'objectif n'est pas d'obtenir une expérience graphiquement fidèle à la réalité, mais plutôt d'évoquer de manière schématique les effets physiques.



Figure 48 Contour lumineux autour de la plante

⁹ **Un shader** : est un programme informatique qui modifie l'apparence graphique d'un objet, généralement en manipulant la couleur, la luminosité et d'autres aspects visuels dans le rendu graphique. Il est largement utilisé dans les graphismes 3D pour créer des effets visuels dynamiques.

Enregistrement de la voix et Timeline

Pour la voix, nous avons commencé par rédiger un premier script totalisant 570 mots. J'ai cherché à humaniser au maximum le scientifique afin d'augmenter la présence et l'engagement du visiteur. Pour l'enregistrement, mon tuteur à Universciences, Alexis Amen, s'est prêté au jeu d'incarner le scientifique. Nous disposons du matériel suivant : un microphone Shure connecté au logiciel de MAO Reaper, ainsi qu'un « MicScreen » permettant d'éviter les échos et la réverbération de la pièce. Afin de rendre la voix accessible au maximum pour les déficients auditifs, nous avons suivi les recommandations suivantes lors de l'enregistrement :

- La voix doit avoir un débit lent, voire ralenti [38]. Plus on parle lentement, plus le décodage est facilité pour la personne déficiente auditive.
- Une bonne intensité de voix est primordiale pour qu'elle soit suffisamment perceptible.
- Il doit y avoir des variations dans la voix pour éviter au maximum la monotonie.
- L'articulation et les respirations, d'une manière générale, sont indispensables pour saisir les propos du narrateur.

On peut se rendre compte de l'importance de ces recommandations en consultant la vidéo [39] du Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de l'Est-de-l'Île-de-Montréal qui propose une simulation afin de sensibiliser sur la manière dont les personnes déficientes auditives entendent avec un appareil auditif.

Une fois enregistré et mixé, l'enregistrement total dure 4 minutes 40, décomposé en 10 segments audio. Ensuite, comme dans un logiciel de montage, j'ai créé une « timeline » dans Unity à partir de ces enregistrements audios. Sur la figure 49, vous pouvez voir la timeline finale qui est décomposée en 4 grandes parties :

- La **partie orange** représente les enregistrements audios qui nous servent de structure pour le déroulement de l'expérience. J'expliquerai plus tard la nécessité d'avoir trois pistes audio différentes.
- La **partie grise** avec tous les petits marqueurs représente des appels à des scripts. Par exemple, l'un des marqueurs appelle le script qui nous rétrécit ou un autre qui met sur pause la timeline en attendant une action du joueur, comme « lever le pouce ».
- La **partie bleue** représente les animations de différents objets, par exemple la goutte d'eau qui s'aplatit.
- La **partie verte** représente les activations et désactivations d'objets, par exemple l'apparition de gouttes d'eau à jeter.

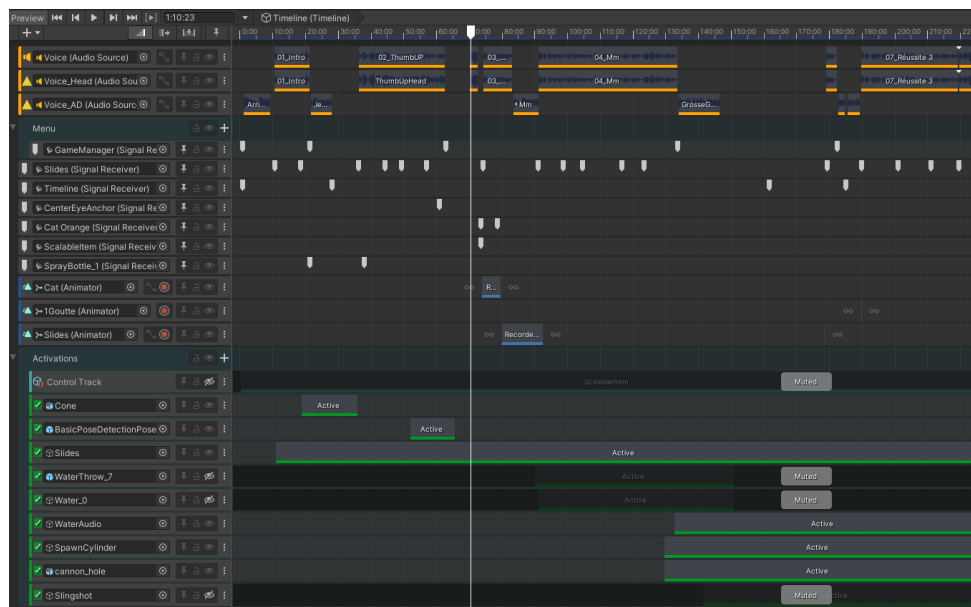


Figure 49 Timeline général de l'expérience

Une fois cela intégré, nous pouvions jouer l'expérience du début à la fin. Cependant, nous avons constaté des problèmes de rythme dans l'explication. Avant le rétrécissement, nous avons une explication qui durait plus de 30 secondes, et le joueur n'avait aucune interaction. Nous avons donc décidé de réécrire cette partie et de redynamiser certains passages. Lors de ce deuxième enregistrement, nous avons appliqué des guidelines concernant le « français simplifié » qui est une version simplifiée de FALC (Facile à Lire et Comprendre). Il n'est pas seulement utile pour les personnes en situation de handicap rencontrant des difficultés de compréhension, mais aussi pour d'autres publics tels que les personnes étrangères maîtrisant peu le français, les personnes âgées et les enfants.

Voici quelques précautions du « français simplifié » :

- Ne pas utiliser : de métaphores / de mots d'une langue étrangère, sauf s'ils sont très connus / d'abréviations, initiales, acronymes.
- Simplifier le contenu au maximum
- Expliquer les mots compliqués avec des mots simples
- Eviter formes passives, formes négatives
- Utiliser des exemples
- Utiliser le même mot à chaque fois qu'on évoque la même chose

Interface pour sous-titres

En réalité virtuelle, il n'y a pas d'éléments d'interface affichés en continu sur l'écran du casque, car cela peut provoquer des sensations de malaise (motion sickness). La plupart des interfaces existent dans le monde virtuel sous la forme de panneaux d'écran ou de manière plus diégétique¹⁰. Cela devient complexe lorsqu'il s'agit d'intégrer des sous-titres qui doivent être visibles en permanence pour l'utilisateur. Cela peut entraîner plusieurs problèmes, tels que la profondeur à laquelle nous affichons les sous-titres, par exemple, ils peuvent être cachés par une texture (voir figure 50).

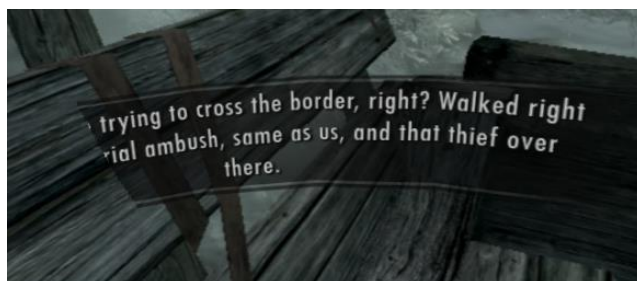


Figure 50 Problème d'affichage de sous-titre dans SkyrimVR

La méthode la plus répandue consiste à les afficher en bas du champ de vision du joueur et à les déplacer seulement lorsqu'il s'éloigne trop de la vision du joueur. C'est une méthode notamment utilisée par « Half-Life: Alyx » (voir figure 51), mais certaines règles doivent être respectées pour assurer la lisibilité du texte. Par exemple, le texte doit être affiché sur un fond semi-transparent pour mieux le faire ressortir, il doit être suffisamment grand pour être lisible par un maximum de personnes, et les phrases doivent être courtes mais ne pas défiler trop rapidement pour faciliter la lecture [40]. Les sous-titres en réalité virtuelle peuvent également fournir des informations sur la localisation de la personne qui parle, en utilisant par exemple des flèches (voir figure 53) ou, dans un mode plus exploratoire, en affichant les sous-titres directement sur la personne (voir figure 52) [41].



Figure 51 Sous titres dans Half-Life : Alyx

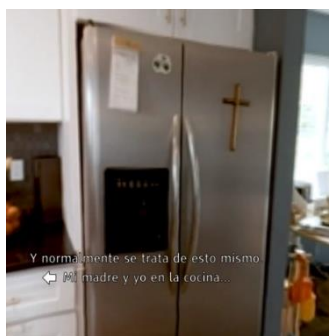


Figure 53 Sous-titres avec information de position



Figure 52 Sous-titres avec une position 3D

¹⁰ **Diégétique** : Relatif à la diégèse, à l'espace-temps dans lequel se déroule l'histoire proposée par la fiction d'un récit, d'un film.

J'ai choisi une interface fixe, représentée par un grand panneau graphique semi-transparent (voir figure 54), qui demeure constamment orienté vers l'utilisateur, appelé un Billboard. Nous sommes naturellement attirés à lire le panneau, étant donné que nous demeurons assis et que les actions à effectuer se trouvent dans notre champ de vision, là où le panneau est positionné. De plus, l'utilisation d'images recommandée par les GAG pour l'illustration n'était pas possible avec les sous-titres qui se déplacent.



Figure 54 Panneau graphique semi-transparent

Les images d'illustration consistent en des schémas explicatifs ou des représentations d'objets avec lesquels interagir. Le texte, affiché en police Arial avec une taille de 36, est en accord avec les directives pour le français simplifié. J'ai ainsi développé un système de sous-titres permettant d'ajouter à chaque fois du texte accompagné d'une image. Par ailleurs, j'ai intégré la possibilité de créer des dialogues alternatifs afin d'incorporer ultérieurement des dialogues spécifiques aux interactions avec la tête. Un code couleur a également été défini pour mettre en évidence les actions importantes à réaliser. Une fois les données renseignées, il suffit de les synchroniser avec les pistes vocales dans la timeline.

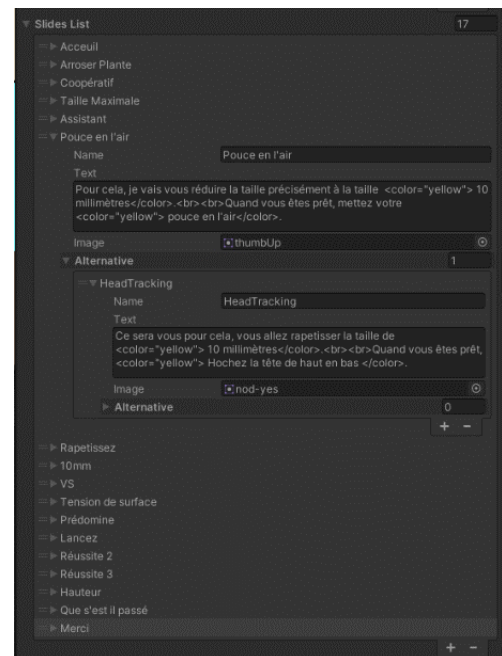


Figure 55 Outils d'intégration des sous-titres et images

Observations des publics et ajustements

Nous avons installé le prototype le 20 janvier au Carrefour Numérique, et pendant la semaine suivante, nous avons observé différents comportements du public. Tout d'abord, la limite déconseillée aux moins de 13 ans n'a pas du tout été respectée. De plus, les enfants se levaient durant l'expérience afin d'explorer, ce qui devenait dangereux car un mur n'était pas loin. Un fauteuil assez imposant était installé à l'origine, mais les parents s'asseyaient à côté de leurs enfants, qui ne voyaient pas l'environnement réel, ce qui est une fois de plus dangereux. Le fauteuil pose un autre problème : le menu avec la table et le bouton s'aligne en face de la tête quand la personne met le casque. Cependant, si on met le casque vers la droite, la table virtuelle se superpose au fauteuil réel.

Afin de remédier à ces problèmes, nous avons apporté plusieurs modifications. Tout d'abord, nous avons remplacé la grande banquette par un fauteuil plus petit sans accoudoirs (voir figure 56). La banquette fut déplacée sur le côté pour que les personnes puissent s'asseoir pour attendre leurs tours.



Figure 57 Mobilier avant modification



Figure 56 Mobilier après modification

La consigne à reçue les ajustements suivants :

- Pour rendre plus visible « déconseiller au moins de 13 ans » nous avons utilisé un logo aux lieux du texte.
- Les deux feuilles A4 ont été remplacées par un écran de 55 pouces pour attirer plus le regard sur les explications et instructions.
- Nous avons ajouté un temps estimer de l'expérience pour fluidifier le fil d'attente mais aussi rassurer certaines personnes autistes qui souhaitent savoir ce type d'information.
- Nous avons donné en tant que première instruction : de s'asseoir tout au long de l'expérience.

Nous avons donc réalisé plusieurs itérations de la consigne pour la rendre visible et attractive jusqu'à arriver à une forme définitive (figure 58).



Figure 58 Modification des consignes

L'expérience en elle-même a reçu plusieurs changements notables :

- Dans la scène du menu la table tourne autour de nous et un texte au-dessus du bouton rouge précise : « Regarder devant vous, rester assis tout au long de l'expérience puis appuyer sur le bouton rouge »
- Avant pour que la goutte d'eau s'étale il fallait lancer 3 petite goutte d'eau mais les visiteurs avaient du mal réalisé cette étape donc j'ai réduit à une goutte d'eau.
- J'ai ajouté un bouton recommencer l'expérience que l'on peut activer à tout moment en plus de redémarrage automatique quand le casque ne reconnaît personnes.
- Arroser la plante était trop long selon les visiteurs j'ai donc raccourci le temps de 8 à 5 secondes.
- J'ai ajouté plus d'objet interactifs par exemple un miaulement du chat quand on le caresse ce qui rajoute ce qui renforce notre présence dans le monde virtuel.

Néanmoins, les retours des visiteurs concernant l'expérience sont extrêmement positifs et encourageants pour la suite. Un certain nombre de personnes n'avaient jamais utilisé de casque de réalité virtuelle, encore moins avec une fonction de suivi des mains. Cependant, ils ont pu mettre le casque et profiter de l'expérience en toute autonomie. Les groupes de visiteurs se prenaient en photos et essayaient de deviner ce que la personne faisait avec ses mains, car il n'y avait pas de retour vidéo. Cela était un choix de notre part, car nous ne souhaitons pas divulguer le dispositif aux personnes ne l'ayant pas testé. De plus, cela nous permettait d'obtenir des données plus fidèles en évitant que les visiteurs n'apprennent à utiliser le dispositif avant de mettre le casque.

IV) Deuxième Itération

Après avoir amélioré et corrigé la première itération, il était temps de créer les nouvelles fonctionnalités pour la seconde phase en vue des prochains tests en vue de la PGW et les tests organisés par la DQUA. Voici les nouvelles user stories, le joueur aura la possibilité :

- D'attraper des objets avec sa tête.
- De déplacer des objets avec sa tête.
- De déclencher un événement quand il fait un signe spécifique avec sa tête.
- De profiter d'une audio description de l'environnement.
- D'avoir un feedback sonore quand il interagit avec des objets
- De pouvoir choisir les paramètres de l'expérience au début de celle-ci.
- De pouvoir ajuster les contrastes et la luminosité.

Ajout de nouvelles fonctionnalités

Le suivi de la tête est une des interactions les plus anciennes dans la réalité virtuelle moderne elle a commencé avec le cardboard de Google où on pouvait pointer un élément pour l'activer. Le principe est simple on regarde un objet un compteur apparaît pour nous signaler de continuer à regarder l'objet si on veut interagir avec celui-ci. Une fois le compteur arrivé à son terme, il effectue une action. Le compteur peut être sous plusieurs formes : soit avec des chiffres qui décroissent vers zéro, soit avec différents types de barre de progression qu'elle soit circulaire ou rectangulaire.

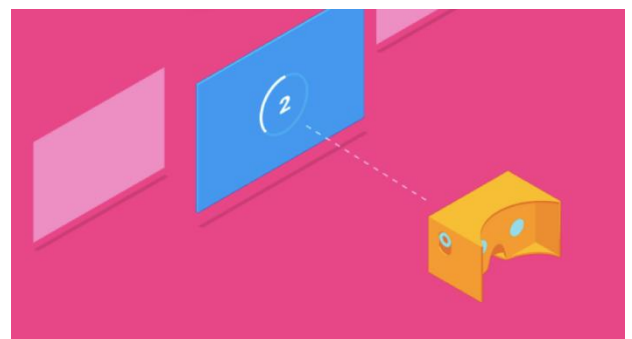


Figure 59 Exemple interaction avec la tête

Intégrer cette fonctionnalité permet à toute personne qui ne peut ou ne souhaite pas utiliser ses mains d'interagir dans l'expérience. J'ai donc intégré cette interaction en quelques heures à l'aide du package de Thomaz Saraiva [42] qui fonctionne de manière très simple : une fois que notre tête est associée à un pointeur, celui-ci, lorsqu'il rencontre un objet avec un tag particulier, effectue une action. J'ai pu développer la possibilité de saisir et de déposer des objets une fois que nous avons terminé notre tâche avec ceux-ci. Par exemple, pour l'étape où l'on doit saisir le spray pour arroser la plante, on attrape le spray en le regardant, on le déplace sur la plante, et lorsque la plante est arrosée, le spray est automatiquement replacé à sa position initiale.

Pour l'étape du pouce levé, j'ai choisi d'utiliser une autre technique au lieu d'afficher des boutons à regarder. J'ai décidé de le remplacer par un hochement de tête de haut en bas,

comme pour dire oui. Cela permet également de varier un peu les interactions possibles avec la tête.

L'étape la plus complexe à maîtriser lors de la première itération, était le lancer de gouttes sur la plus grosse goutte. Dans l'expérience initiale, il fallait réussir le lancer trois fois, ce qui était particulièrement difficile pour un certain nombre de personnes. Un lance-pierre (figure 62) était également disponible pour faciliter le lancer, mais cela s'est avéré peu concluant.

Dans cette nouvelle version, j'ai intégré un canon qui permet de lancer la goutte d'eau de manière plus simple. Il suffit de déposer la goutte dans l'encoche, et le canon tire automatiquement. Pour les interactions avec la tête, nous avons le choix entre pousser les petites gouttes dans la grosse goutte ou utiliser le canon (voir figure 60).

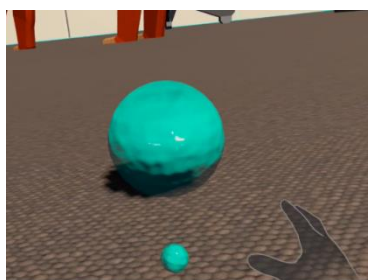


Figure 61 Lancer de goutte à la main



Figure 62 Lancer de goutte avec lance pierre

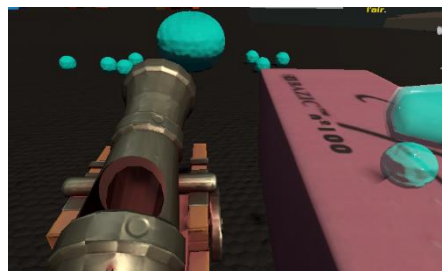


Figure 60 Lancer de goutte avec canon

En collaboration avec Rima Dhrif, chargée d'accessibilité pour le public déficient visuel et elle-même déficiente visuelle, nous avons ajusté les contrastes et la luminosité afin que les objets ressortent mieux dans l'environnement. Sur ses conseils, ainsi que sur ceux de Jérôme Dupire, j'ai intégré une flèche rouge (figure 63) qui pointe en direction de l'objet avec lequel nous devons interagir, même s'il est en dehors de notre champ de vision.



Figure 65 Flèche rouge d'indication



Figure 64 Sans haute luminosité et haut contraste



Figure 63 Avec haute luminosité et haut contraste

L'audio-description en réalité virtuelle est rarement exploitée, principalement parce que dans la plupart des cas, l'utilisateur se déplace dans de grands environnements. Néanmoins, on peut penser à certains jeux qui ont accordé plus d'attention à ces questions d'accessibilité, comme par exemple « Owlchemy Labs » [43] qui a développé un outil d'assistance visuelle avec les caractéristiques principales suivantes :

- **Mise en évidence à fort contraste des objets** : Cette fonctionnalité souligne les objets essentiels dans l'environnement pour une meilleure visibilité.
 - **Rétroaction haptique** : Des vibrations supplémentaires dans la manette se produisent lors de la mise en évidence d'un objet et lors du choix de l'endroit où le joueur souhaite se téléporter.
 - **Audio désactivable** : Les utilisateurs peuvent arrêter les descriptions d'objets en appuyant sur le bouton d'assistance tout en visant l'objet.
 - **Confirmation de la prise et du relâchement** : En maintenant enfoncé un bouton, une notification audio informe le joueur quand un objet est saisi et relâché.
-
- **L'Audio description des :**
 - **Objets** : En appuyant sur le bouton d'assistance tout en visant ou en tenant un objet, des noms et des informations audios sont fournis.
 - **Environnements** : L'audio décrit la scène lors du début de celle-ci.
 - **Zones** : L'audio fournit des noms de lieu lors du choix de l'endroit où se téléporter. Une confirmation audio est entendue après la téléportation.
 - **Tutoriels** : Des instructions audio sont fournies, complétant les tutoriels visuels.



Figure 66 Menu d'accessibilité d'Owlchemy Labs

C'est en suivant cet exemple, notamment sur l'audio description de l'environnement, des objets et des informations d'interactions, que je me suis occupé tout d'abord de l'audio description de l'environnement. Pour cela, j'ai utilisé une voix d'intelligence artificielle de l'entreprise « ElevenLabs », qui possède des voix très humanisées pour de l'IA. De plus, cela me permettait de modifier la vélocité et les intonations, tout en me permettant d'itérer facilement. J'ai ensuite inséré ces segments d'audio description entre les phases de dialogues, comme on peut le voir avec la piste « Voice_AD » sur la figure 67.

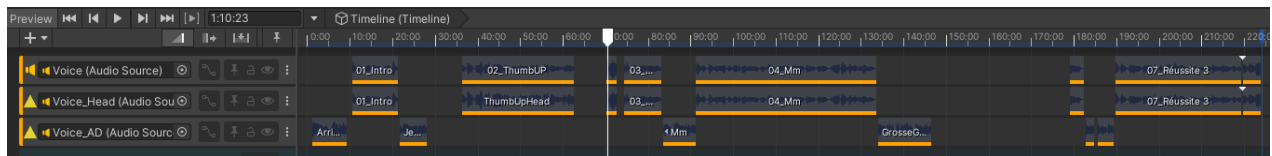


Figure 67 Timeline audio

Pour la description des objets, j'ai suivi le même principe que « Owlchemy Labs », mais leur expérience était pensée pour se jouer à la manette et non avec du hand tracking ou du head tracking. Ainsi, au lieu d'appuyer sur un bouton et de passer sa main dans un objet pour connaître sa description, nous avons simplement à regarder l'objet en mode « tête » et à passer la main à l'intérieur en utilisant le hand tracking.

Pour renforcer la description des objets et de l'environnement, j'ai amélioré le Sound design de l'expérience. Les objets interactifs sont définis par un son toujours similaire, assez rond, avec une réverbération correspondante à la pièce. Le spray est associé à un son de pulvérisation qui se déclenche lorsque nécessaire et s'arrête une fois la plante arrosée. Lorsque la plante grandit, j'ai utilisé un synthétiseur ainsi qu'un son d'arbre tombant que j'ai inversé et agrandi, afin de donner une dimension organique et tonale au son. Le synthétiseur joue un accord majeur, note par note de la plus grave à l'octave supérieure, ce qui fournit une indication inconsciente sur la progression de la plante.

J'ai également positionné un maximum de sons ambiants dans l'espace, ce qui permet de se situer dans l'espace et de mieux ressentir l'étape de la descente. Par exemple, le son du chat qui s'élève jusqu'à la taille d'un immeuble nous permet, seulement par le son, de comprendre les échelles.

En intégrant l'audio description, le head tracking, et les hauts contrastes/luminosité, il fallait ensuite avoir la possibilité de les sélectionner dans un menu au début de l'expérience. Pour cela, j'ai dû enlever la table et la remplacer par un grand panneau graphique (voir figure 68) qui se déplace dans le cas où il sort de notre champ de vue. Ce panneau est composé d'un texte avec des mots importants surlignés en jaune, de deux boutons pour dire « oui » ou « non » en les regardant avec la tête, et d'un bouton « Annuler » pour revenir à la première option. Nous pouvons aussi dire « oui

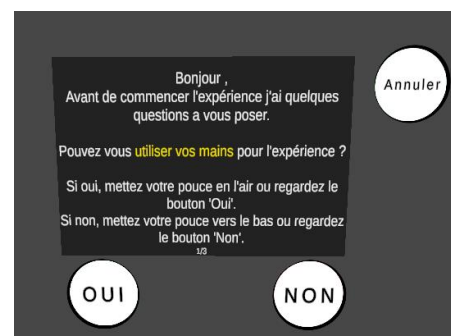


Figure 68 Menu pour la deuxième itération

» ou « non » en levant ou baissant le pouce. Les consignes en version audio tournent en boucle et changent en « Continuez de regarder le bouton oui/non pour confirmer » quand on pointe un choix.

Paris Games Week et Tests d'accessibilités

Une fois ces fonctionnalités développées, il était prévu de les tester à la Paris Games Week mais aussi lors des tests organisés par la DQUA. Pour cela, nous avons rédigé un questionnaire de 19 questions, décomposé en 4 parties :

- **Mise en place du casque** : centrée sur l'ergonomie du casque en tant que matériel.
- **Choix du menu** : concerne le choix des différentes options d'accessibilité.
- **Expérience** : évalue les capacités des personnes durant l'expérience et la cohérence avec les choix effectués dans le menu.
- **Général** : regroupe les questions sur l'appréciation générale de l'expérience

Une fois ce questionnaire finalisé, j'ai donc présenté le prototype pendant trois jours à la Paris Games Week, au sein de l'espace dédié « Jouez comme vous êtes ». Cet espace réunit une dizaine d'associations et de studios engagés dans la promotion de l'accessibilité et de l'inclusion des personnes en situation de handicap, notamment CapGames. Ce dernier se consacre depuis dix ans à l'amélioration de l'accessibilité dans le domaine du jeu vidéo, avec des missions axées sur la veille technologique et l'identification des jeux les plus accessibles [44]. Durant cette période, j'ai pu faire tester l'expérience à 42 personnes, dont 9 en situation de handicap (deux personnes à mobilité réduite, deux personnes déficientes visuelles, deux personnes déficientes auditives, trois personnes avec un Trouble du Spectre de l'Autisme). Ma méthodologie pour ces tests était la suivante : le participant réalisait l'expérience, une fois terminée, il répondait au questionnaire rédigé avec la DQUA, et à la fin, nous avions un échange plus ouvert de quelques minutes sur les améliorations potentielles.



Figure 69 Stand à la Paris Games Week

Sur les 42 personnes ayant testé ce dispositif, j'ai pu interroger 20 d'entre elles à l'aide du questionnaire en raison du flux, mais j'ai néanmoins relevé plusieurs données intéressantes. 75 % des testeurs ont trouvé les menus plutôt clairs. Une personne malentendante m'a fait remarquer qu'il faudrait réduire le débit de la voix et qu'il y avait peut-être trop d'informations. Tous ont estimé que l'accessibilité était cohérente et agréable en relation avec le choix du menu. L'un des problèmes liés à la participation à un salon est le niveau élevé de bruit ambiant tout autour, ce qui explique les résultats de la figure 70 avec trois personnes trouvant la voix inaudible. Cependant, la majorité a bien compris les instructions données. La moyenne était de 5 minutes et 25 secondes, et neuf personnes ont trouvé l'expérience assez courte, tandis que dix autres ont jugé cela suffisant et un seul à trouver l'expérience longue (figure 70).

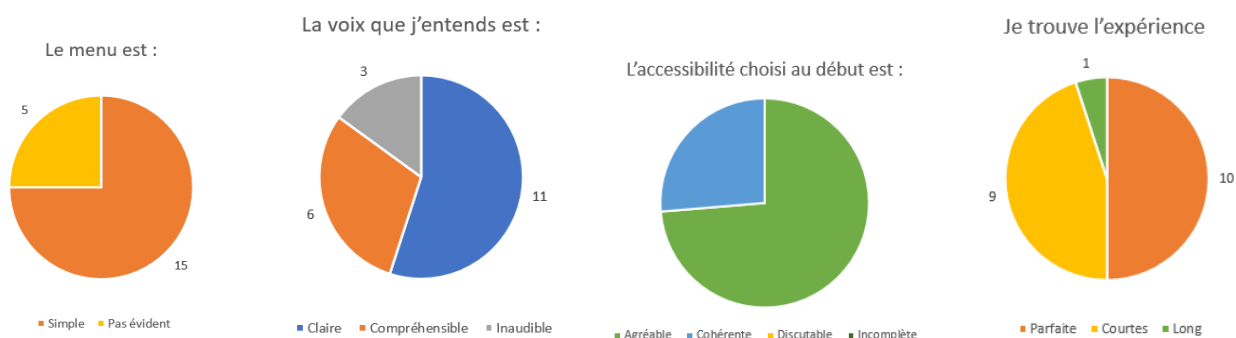


Figure 70 Résultat du questionnaire

Au cours des entretiens à la PGW, mais aussi lors des sessions organisées par l'accessibilité de la Cité des sciences, plusieurs améliorations ont été suggérées. Une personne présentant un trouble de l'attention a noté qu'il y avait trop de mouvements pendant les explications, soulignant qu'elle était captivée par le chat et n'avait pas écouté les consignes. Elle a proposé la possibilité de mettre en pause la voix, ce qui rejoint la proposition d'un enfant suggérant de pouvoir passer manuellement les consignes avec un geste, afin de suivre son propre rythme.

Un autre testeur, ayant un Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA), a suggéré l'idée de pouvoir régler plus finement les contrastes et la luminosité au lieu d'avoir des données prédéfinies. Une personne déficiente visuelle, ne pouvant voir que de l'œil gauche, nous a conseillé de placer au maximum des objets interactifs devant l'utilisateur, car il risquait de ne pas les voir. Cette suggestion rejoint le besoin d'une personne à mobilité réduite, qui a proposé la même idée pour faciliter la manipulation des objets.

Étude de l'agence « Indivisible »

Indivisible est une agence spécialisée dans le conseil, l'étude et la conception de politiques publiques, mettant l'accent sur la promotion de l'innovation centrée sur les utilisateurs. Ils ont pu intervenir sur 2 jours, les 31 octobre et 3 novembre, pour effectuer leurs tests sur la première itération du prototype. Je leur ai fourni les données internes récupérées dans le fichier JSON précédemment mis en place. Ils ont donc observé 37 personnes en interrogeant 28. L'échantillon était composé de :

- **75 %** d'enfants / ados
- **55 %** hommes / garçons
- **46 %** région parisienne
- **57 %** première fois à la Cité des sciences
- **62 %** des visiteurs n'avaient jamais utilisé de VR
- **16 %** en avait fait plus de 2 fois
- **0 %** ayant un casque chez eux

Le dispositif est utilisé principalement par des enfants et adolescents, dont la majorité avait moins de 13 ans. Cela peut s'expliquer pour différentes raisons :

- D'une part, la promesse ludique de l'expérience
- Le public très familial de la Cité des sciences, d'autant plus en période de vacances scolaires
- L'environnement du dispositif (vitrines avec des jouets, des maquettes...)
- Le nombre de personnes autour du dispositif, les parents / adultes se sentant obligés de laisser la place aux enfants.

Leur approche pour cette étude s'est concentrée sur une analyse du parcours utilisateur qu'ils ont décidé de découper en plusieurs étapes, en utilisant une combinaison d'enquêtes, d'observations, d'entretiens et d'analyses de comportement. Des données quantitatives et qualitatives ont été recueillies pour comprendre les motivations, les frustrations et les besoins des utilisateurs à chaque étape. Cette méthodologie permet d'identifier les opportunités d'amélioration et de mettre en évidence les aspects positifs du dispositif tel qu'il est actuellement et tel qu'il pourrait être.

Le parcours a été conceptualisé en 12 étapes considérées comme pertinentes par rapport au dispositif, allant du premier point de contact à l'envie d'en savoir plus :

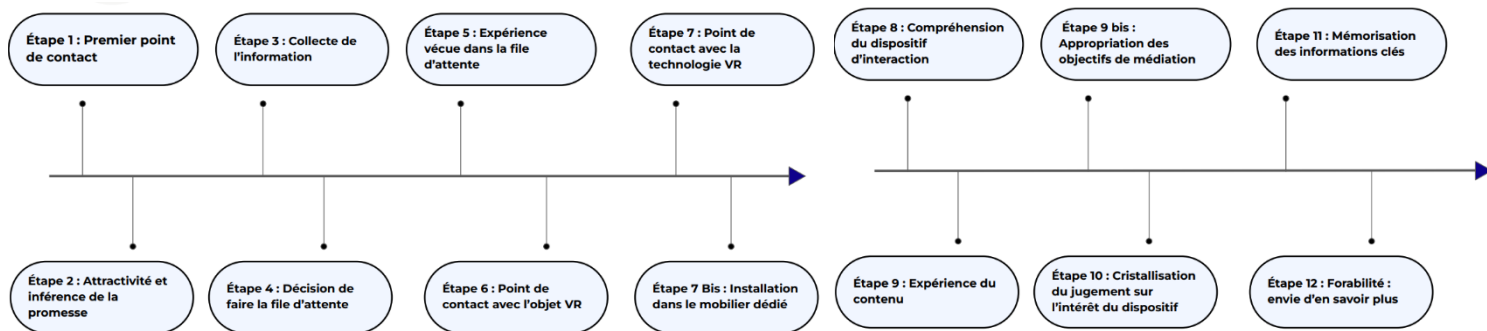


Figure 71 Parcours utilisateur pour l'expérience

Étape 1 : Premier point de contact

Objectifs : Observer si le dispositif est visible / Compréhension de l'expérience proposée.

Observation : Nombre de visiteurs qui s'arrêtent / Nombre de visiteurs qui passent à côté sans s'en rendre compte

Résultats : « Indivisible » a pu observer une forte attractivité du dispositif : 74 % des personnes qui sont passées devant, se sont arrêtées. La totalité des visiteurs sont arrivés par hasard, soit en se promenant, soit pour aller à une autre activité, comme Fab Lab. Les visiteurs remarquent le dispositif par l'observation de l'utilisateur en place et non par la lecture de l'écran de médiation.

Étape 2 : Attractivité et inférence de la promesse

Objectifs : Comprendre si la personne est attirée et pourquoi / Comprendre son Inférence de la cible / Comprendre son inférence de la promesse

Résultats : pour le dispositif mentionné par les utilisateurs :

- La curiosité pour l'expérience
- L'amusement
- Le désir de découverte
- Observer le comportement des autres

Certains participants ont spécifié que l'expérience semblait destinée aux enfants, et d'autres ont préféré laisser la priorité aux enfants comme raison de leur non-participation.

Étape 3 : Collecte de l'information

Objectif : Comprendre la prise d'informations, et la collecte de données par l'utilisateur

Résultat : « Indivisible » a pu constater que 98 % des utilisateurs sont entrés dans le dispositif par l'observation du dispositif et non par l'écran de médiation. Avec l'observation et entretiens, il a été constaté que seulement 42 % des visiteurs avaient vu l'écran de médiation. On peut citer également, que les utilisateurs indiquent ne pas souhaiter de retour pour avoir la surprise de l'expérience. La curiosité et la projection imaginaire de ce à quoi peut ressembler l'expérience joue, un rôle important dans l'attractivité. Le fait d'avoir un retour empêcherait cette tension plaisante.

Etape 4 : Décision de faire la file d'attente

Objectif : Comprendre l'impact de la file d'attente dans le choix de participer

Résultat : La moyenne de temps d'attente est de 6 minutes environ avec des disparités en fonction de la fréquentation, on a pu observer une attente maximale de 17 minutes par exemple. Globalement, la file d'attente n'est pas un repoussoir, les visiteurs sont prêts à attendre un moment pour réaliser l'expérience. Il y a eu environ 9 % d'abandon, notamment lié à une attente assez longue pour accéder au dispositif.

Etape 5 : L'expérience de faire la file d'attente

Objectif : Comprendre l'expérience vécue dans la file d'attente

Résultats : La totalité des personnes qui attendent y prennent du plaisir. L'expérience de la file d'attente est un mini-spectacle interactif. Le comportement des personnes dans la file d'attente semble surtout tourné autour de l'observation de l'utilisateur en cours. Des interactions sociales sont présentes, avec des regards, des discussions, et dans certains cas, la lecture de l'écran de médiation. L'observation provoque des rires, des discussions, des commentaires. Dans l'ensemble, la file d'attente semble être un lieu où les usagers manifestent surtout de l'excitation envers le dispositif. Quelques-uns se promènent autour du dispositif en attendant leur tour. Lorsqu'il y a beaucoup de monde, l'attente peut être anarchique et certains mettent plus de temps que les autres à accéder au dispositif. Également il y a une incompréhension sur le panneau : il est indiqué 2 minutes d'expérience mais certains restent plus longtemps.

Etape 6 : Point de contact avec l'objet VR

Objectif : Comprendre la prise en main avec l'objet

Résultats : On a pu observer que la durée de prise en main moyenne avec le casque est d'environ de 7 secondes. L'aisance évaluée moyenne des utilisateurs est de 3.2 / 4. Globalement, les utilisateurs ne rencontrent pas de grandes difficultés avec la mise en place du casque. Ils ont pu noter tout de même que :

- Pour ceux qui ont du mal à mettre leur casque, la famille joue un rôle de médiateur
- Difficulté à mettre le casque avec des lunettes.

- Rencontre des problèmes avec la molette de réglage, car ils n'ont pas toujours bien vu la molette.
- En mettant le casque, ils appuient sur le bouton du son et l'éteignent.

Étape 7 : Point de contact avec la technologie VR

Objectif : Comprendre la prise en main avec la technologie

Résultats : On peut observer que même si une majorité des personnes n'a jamais utilisé de VR, l'habitude de l'usage du casque est plutôt satisfaisante : 3.1 / 4. Les utilisateurs, ont par leurs habitudes technologiques, peu de mal à s'approprier le dispositif. Dès le début de l'expérience, on peut observer sur le visage des participants les émotions suivantes : l'intérêt, la curiosité et l'émerveillement.

Étape 8 : Installation du mobilier dédié (autonomie et sécurité)

Objectif : Tester l'adéquation du dispositif avec sa structure

Résultats : Au niveau de l'hygiène, même si cela n'est pas bloquant pour les usagers, certains ont manifesté le souhait d'avoir un dispositif pour nettoyer le casque. Globalement le mobilier est considéré comme adapté par les utilisateurs, même si on peut remarquer que le fauteuil n'étant pas fixé, il se déplace au fur et à mesure de la journée, et à la fin il peut être éloigné du point de départ et certains utilisateurs restent debout. De plus, le fauteuil est pris pour certains comme un reposoir pour le casque.

Étape 9 : Expérience du contenu

Objectif : Comprendre la qualité ergonomique, jouabilité, le plaisir et l'intérêt pour le contenu

Résultats : Globalement, les visiteurs ont trouvé l'expérience simple à comprendre. Il y a assez souvent une médiation par les pairs : par exemple, un garçon qui est passé juste avant, explique à sa mère comment saisir l'objet virtuel. Mais certains utilisateurs qui n'avaient pu en regarder d'autres utilisateurs au préalable, ont eu du mal à réaliser le premier geste. Le temps moyen passé sur le dispositif était d'en moyenne 4 minutes 42 secondes cela comprend le temps d'installation. Mais le temps passé à l'intérieur, de l'expérience était lui en moyenne de 3 minutes et 12 secondes. Ce qui démontre que le casque a été plutôt simple à mettre, « Indivisible » a souligné que les personnes qui venaient de passer, ont aidé les suivantes à comprendre comment mettre le casque, même si elles ne se connaissaient pas. Par ailleurs, il n'y a pas de limite temporelle à l'expérience, un des utilisateurs est resté 15 minutes.

Étape 9 bis : Appropriation des objectifs de médiation

Objectif : Comment le joueur comprend ce qui est attendu en termes d'interactions

Résultats : La majorité des utilisateurs ont trouvé que les interactions étaient simples à prendre en main. Malgré tout, à travers les entretiens, quelques difficultés sont ressorties : Des difficultés avec le lance-pierre

- Un peu de mal à appuyer sur le bouton rouge, avec des tentatives d'appuyer comme sur un buzzer
- Des problèmes d'interaction avec l'arrivée sur les objets, suggérant une amélioration de la fluidité.
- Perte de vue de la bulle d'eau, confusion sur la nécessité de se lever pour la voir

Le canon mis en place par la suite avait l'air de mieux fonctionner.

Etape 10 : Cristallisation du jugement sur l'intérêt du dispositif

Objectif : Quelle opinion a la personne sur la qualité du dispositif à la fin de l'expérience

Résultats : L'expérience rencontre un grand engouement. D'après les entretiens, 100 % des participants recommanderaient cette expérience, et parmi eux, certains souhaiteraient la recommencer ou essayer une autre expérience en réalité virtuelle. De plus, un souvenir de l'expérience persiste, car de nombreux utilisateurs filment leurs pairs lorsqu'ils utilisent le dispositif. Cette documentation spontanée à travers des vidéos et des photos réalisées par les utilisateurs, souvent avec leurs familles ou amis, pourrait facilement devenir un outil de communication pour l'exposition ou le musée, notamment en y intégrant le logo.

Etape 11 : Mémorisation des informations clés

Objectif : Compréhension du message

Résultats : Dû notamment à un problème de son, la majorité des utilisateurs n'ont pas reçu les explications audios. L'écran de médiation et les textes internes au dispositif étant très peu lus, le taux de rétention d'information est donc assez faible. Parmi les personnes interrogées, 42 % ont lu le panneau de médiation avant ou après le dispositif (souvent en attendant un pair). Sur ceux qui l'ont lu, seulement 28 % l'ont parcouru en entier, les autres se sont limités à lire les informations les plus importantes, notamment le titre, le logo "-13 ans", et "2 min".

Etape 12 : L'envie d'en savoir plus

Objectif : Appétence pour le sujet

Résultats : Lors des entretiens, il ressort que 90 % des utilisateurs aimeraient un tableau récapitulatif à la sortie, du fait qu'ils ont retenu assez peu d'informations de l'expérience. D'une part, les utilisateurs ont apprécié l'expérience, ce qui devrait les pousser à en savoir plus sur le sujet. D'autre part, les utilisateurs ont retenu peu d'informations.

Amélioration après la deuxième version

Comme nous avons observé, il y a encore beaucoup d'améliorations à réaliser, mais la plus importante est sans doute le problème de désactivation du son. Cela est dû à la protection métallique de TitanSkin qui avait positionné des antidérapants qui ne tiennent pas à l'usage, ce qui a pour effet d'appuyer sur le bouton de diminution du volume du casque. C'est pour cela, qu'avec le designer Donatien Lenoir, nous avons réfléchi à une méthode temporaire pour résoudre cette problématique. Nous avons appliqué une résine à la base du casque, ce qui lui permet, une fois fixé, de ne plus bouger. De plus, nous prévoyons de cacher le bouton de volume à l'aide d'une petite pièce en bois, ce qui permettra de limiter la possibilité de baisser le volume.

Le deuxième point de modification concerne l'ajout de la Langue des Signes Française (LSF) en prévision des prochains tests. J'ai intégré la possibilité de démarrer une vidéo dans la fonction de sous-titres (figure 72). Cela permettra d'ajuster les vidéos par rapport à la voix qui nous donne les instructions. J'ai programmé la vidéo de manière qu'elle soit toujours orientée vers notre tête et qu'elle nous suive lorsque celle-ci n'est plus dans le champ visuel. Ensuite, j'ai sollicité l'aide de Myriam, une de mes connaissances parlant la langue des signes, pour traduire quelques passages et évaluer le bon fonctionnement (figure 73). Notre objectif sera de tester dans les mois suivants si la LSF sous format vidéo est suffisante ou non pour transmettre des informations aux personnes déficientes auditives utilisant la LSF. Il est important de souligner que ceci n'est encore qu'un prototype destiné uniquement à des tests, car l'obtention d'une qualité professionnelle nécessiterait l'organisation d'un tournage, ce qui prendrait un certain temps.

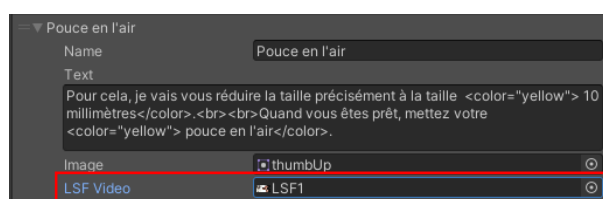


Figure 73 Intégration de la vidéo LSF à l'outil de sous-titre



Figure 72 LSF dans l'expérience

Conclusion

Pendant un mois, l'expérience a été exposée et 1099 personnes (d'après les données du casque) ont participé à l'expérience. Les visiteurs se sont montrés curieux et intéressés face à cette proposition, n'hésitant pas à s'approprier le dispositif. Nous avons pu observer que les outils que nous avons mis en place permettent au dispositif d'être utilisé par un plus large panel de public. Les options permettant de personnaliser l'expérience avec le suivi de la tête, l'audio-description ou les paramètres de luminosité/contraste ont permis de répondre à un plus grand nombre de besoins des utilisateurs, en se basant sur les capacités de chacun. De plus, ces options ne sont pas chronophages en développement quand on les prévoit dès le début de celui-ci. En outre, les autres fonctionnalités présentes dans toutes les expériences, telles que les sous-titres, les contours jaunes, le Sound design, la flèche de direction, sont utiles à tous les utilisateurs et leur permettent d'avoir une expérience plus riche.

Nous avons pu améliorer l'application au fur et à mesure, grâce à la participation des visiteurs. Cependant, ce dispositif doit encore franchir plusieurs étapes avant de devenir un élément à part entière d'un îlot au Palais de la Découverte. Le prototype soulève encore plusieurs interrogations, surtout en ce qui concerne son exploitation à long terme. Sur une période d'un mois, le casque n'ayant pas été détérioré, il a pu continuer à fonctionner sans s'arrêter, ce qui est encourageant. Cependant, quel entretien va-t-il être nécessaire sur plusieurs années ? Il faudra également réfléchir à la scénographie finale à donner à ce dispositif, ainsi qu'à l'amélioration de la protection pérenne avec TitanSkin. En collaboration avec le commissaire scientifique Jean Michel Courty et le muséographe Vincent Blanch, nous devons affiner notre scénario en fonction d'un prestataire chargé du développement du dispositif.

La découverte du champ de recherche sur l'accessibilité en réalité virtuelle et la prise de conscience des enjeux liés à la mise en place d'un dispositif dans un musée m'ont permis de sortir de ma zone de confort en termes de conception et de développement. Cette expérience personnelle et professionnelle élargit mes horizons, me dotant d'un panel d'outils plus diversifié pour mes créations futures. La diversification de mes connaissances et de mes compétences me permettra d'adopter une approche plus inclusive dans la conception d'expériences en réalité virtuelle.

En collaboration avec la DQUA, notre objectif est de formuler des recommandations pour la conception d'une expérience de réalité virtuelle en visite libre, destinée à être utilisée au Palais ou lors de futures expositions. Ce prototype a contribué à dissiper plusieurs incertitudes initiales, mais nous sommes désormais conscients qu'une expérience en visite libre est réalisable, même si des efforts supplémentaires seront encore nécessaires pour atteindre nos objectifs.

Tables des Figures

Figure 1 Plan provisoire du futur Palais de la découverte.....	7
Figure 2 Design des ilots de multidisciplinaires	9
Figure 3 Schéma sur la portance de l'air	10
Figure 4 Amibe observé au microscope	10
Figure 5 Bactérie avec propulsion par flagelles.....	11
Figure 6 Illustration du soleil	11
Figure 7 Continuum entre réalité et virtualité	12
Figure 8 Paper's Ghost.....	12
Figure 9 Expérience de virtualité augmentée de BMW	12
Figure 10 Schémas récapitulatif de la XR	13
Figure 11 Théâtre optique	13
Figure 12 Le voyage intérieur de Gauguin.....	14
Figure 13 Space Descent 360°	14
Figure 14 Visite VR du British Museum	15
Figure 15 Visite VR du Petit Palais	15
Figure 16 Voyage au cœur de l'évolution	16
Figure 17 Curious Alice: the VR experience	16
Figure 18 Des mondes disparus au muséum d'histoire naturelle.....	16
Figure 19 Visite virtuelle de Notre Dame de Paris	16
Figure 20 Premier prototype pour la Cité des sciences	17
Figure 21 Câbles apparent du dispositif.....	17
Figure 22 Installations général du dispositif de la BNF	17
Figure 23 Ecran de visualisation des contenues.....	17
Figure 24 Dispositif Mira par Memoikos	18
Figure 25 See me, Hear me, Meet me au Museum Ons' Lieve Heer op Solder	18
Figure 26 Film 360 au Centre de phoques de Pieterburen	18
Figure 27 Solution de TitanSkin.....	18
Figure 28 Représentation circulaire du spectre autistique	20
Figure 29 Manette Acess de Sony	24
Figure 30 Manette de l'oculus Quest 2	24
Figure 31 Manette Knuckle de Steam	24
Figure 32 Sangle Élite de l'Oculus Quest 2	28
Figure 33 Explora.....	29
Figure 34 Installation de Mentalista.....	29
Figure 35 Installation de la première itération au Carrefour Numérique	30
Figure 36 Consigne de la BNF.....	30
Figure 37 Installations des cartels sur l'écriteau	32
Figure 38 Première page sur le contenu de la première itération	32
Figure 39 Deuxième page sur le mode d'emploi pour première itérations	32
Figure 40 Exemple de granularité des objets	35
Figure 41 Test avec ajouts de références	37
Figure 42 Test avec les différentes tailles de sphères.....	37

Figure 43 Menu basique.....	38
Figure 44 Tableau Excel une fois les données extraites du JSON	38
Figure 45 Sans et avec modification de la géométrie	39
Figure 46 Shader d'eau.....	39
Figure 47 Schémas d'explications.....	39
Figure 48 Contour lumineux autour de la plante	39
Figure 49 Timeline général de l'expérience	41
Figure 50 Problème d'affichage de sous-titre dans SkyrimVR	42
Figure 51 Sous titres dans Half-Life : Alyx	42
Figure 52 Sous-titres avec une position 3D	42
Figure 53 Sous-titres avec information de position	42
Figure 54 Panneau graphique semi-transparent.....	43
Figure 55 Outils d'intégration des sous-titres et images.....	43
Figure 56 Mobilier après modification	44
Figure 57 Mobilier avant modification	44
Figure 58 Modification des consignes	44
Figure 59 Exemple interaction avec la tête	46
Figure 60 Lancer de goutte avec canon.....	47
Figure 61 Lancer de goutte à la main	47
Figure 62 Lancer de goutte avec lance pierre	47
Figure 63 Avec haute luminosité et haut contraste	47
Figure 64 Sans haute luminosité et haut contraste.....	47
Figure 65 Flèche rouge d'indication	47
Figure 66 Menu d'accessibilité d'Owlchemy Labs.....	48
Figure 67 Timeline audio	49
Figure 68 Menu pour la deuxième itération	49
Figure 69 Stand à la Paris Games Week	50
Figure 70 Résultat du questionnaire	51
Figure 71 Parcours utilisateur pour l'expérience.....	53
Figure 73 LSF dans l'expérience.....	57
Figure 72 Intégration de la vidéo LSF a l'outil de sous-titre	57

Bibliographies

- [1] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, et F. Kishino, « Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum », *Telemanipulator Telepresence Technol.*, vol. 2351, janv. 1994, doi: 10.1117/12.197321.
- [2] *Pepper's Ghost*, (3 septembre 2019). Consulté le: 29 octobre 2023. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=FekGPSiOtvw>
- [3] « BMW brings mixed reality to automotive design with Unreal Engine », Unreal Engine. Consulté le: 29 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.unrealengine.com/fr/spotlights/bmw-brings-mixed-reality-to-automotive-design-with-unreal-engine>
- [4] G. Kim et F. Biocca, « Immersion in Virtual Reality Can Increase Exercise Motivation and Physical Performance », in *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Applications in Health, Cultural Heritage, and Industry*, vol. 10910, J. Y. C. Chen et G. Fragomeni, Éd., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 10910. , Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 94-102. doi: 10.1007/978-3-319-91584-5_8.
- [5] H. Lee, T. H. Jung, M. C. tom Dieck, et N. Chung, « Experiencing immersive virtual reality in museums », *Inf. Manage.*, vol. 57, n° 5, p. 103229, juill. 2020, doi: 10.1016/j.im.2019.103229.
- [6] M. Slater, « A Note on Presence Terminology », p. 5, 2019.
- [7] D. Guttentag, « Virtual reality: Applications and implications for tourism », *Tour. Manag.*, vol. 31, p. 637-651, oct. 2010, doi: 10.1016/j.tourman.2009.07.003.
- [8] H.-L. Chang, Y.-C. Shih, K. Wang, R.-H. Tsaih, et Z. Lin, « Using Virtual Reality for Museum Exhibitions: The Effects of Attention and Engagement for National Palace Museum », 2018.
- [9] P. Vergo, Éd., *The New museology*. London: Reaktion Books, 1989.
- [10] N. Aksakal, « Theoretical View to The Approach of The Edutainment », *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 186, p. 1232-1239, mai 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.04.081.
- [11] « Visite virtuelle interactive », timographie360. Consulté le: 7 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.timographie360.fr/visite-virtuelle-interactive-1193>
- [12] « Voyage au cœur de l'Évolution », Muséum national d'Histoire naturelle. Consulté le: 7 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mnhn.fr/fr/experience/voyage-au-coeur-de-l-evolution>
- [13] « MIRA - Pôle Numérique 3D de Liège ». Consulté le: 9 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://pn3dlg.be/portfolio/mira/>
- [14] « VR headset secure and protection TitanskinVR - », TitanskinVR. Consulté le: 11 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://titanskinvr.com/>
- [15] « VR Experience - Zeehondencentrum Pieterburen », Sealcentre Pieterburen. Consulté le: 11 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.zeehondencentrum.nl/en/visit-us/vr-experience/>
- [16] M. O. L. H. op Solder, « See me, Hear me, Meet me », Museum Ons' Lieve Heer op Solder. Consulté le: 11 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://opsolder.nl/see-me-hear-me-meet-me/>
- [17] « État des lieux de l'accessibilité des équipements culturels ». Consulté le: 12 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.culture.gouv.fr/fr/Thematiques/Developpement-culturel/Culture-et->

handicap/Informations-pratiques/Etat-des-lieux-de-l-accessibilite-des-equipements-culturels

- [18] M. Giroux, « Comment représenter le spectre de l'autisme? », À la découverte d'un autiste-Mathieu Giroux. Consulté le: 12 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://decouverteaspi.wordpress.com/2021/05/26/comment-representer-le-spectre-de-lautisme/>
- [19] M. F. Story, J. L. Mueller, et R. L. Mace, « The Universal Design File: Designing for People of All Ages and Abilities. Revised Edition. », 1998, Consulté le: 13 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://eric.ed.gov/?id=ed460554>
- [20] S. IWARSSON et A. STÅHL, « Accessibility, usability and universal design—positioning and definition of concepts describing person-environment relationships », *Disabil. Rehabil.*, vol. 25, n° 2, p. 57-66, janv. 2003, doi: 10.1080/dre.25.2.57.66.
- [21] Y. Zhao, E. Cutrell, C. Holz, M. R. Morris, E. Ofek, et A. D. Wilson, « SeeingVR: A Set of Tools to Make Virtual Reality More Accessible to People with Low Vision », in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in CHI '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, mai 2019, p. 1-14. doi: 10.1145/3290605.3300341.
- [22] M. Bellani, L. Fornasari, L. Chittaro, et P. Brambilla, « Virtual reality in autism: state of the art », *Epidemiol. Psychiatr. Sci.*, vol. 20, n° 3, p. 235-238, sept. 2011, doi: 10.1017/S2045796011000448.
- [23] K. Dockx *et al.*, « Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease », *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 12, n° 12, p. CD010760, déc. 2016, doi: 10.1002/14651858.CD010760.pub2.
- [24] B. S. Lange *et al.*, « The potential of virtual reality and gaming to assist successful aging with disability », *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.*, vol. 21, n° 2, p. 339-356, mai 2010, doi: 10.1016/j.pmr.2009.12.007.
- [25] F. Heilemann, G. Zimmermann, et P. Münster, « Accessibility Guidelines for VR Games - A Comparison and Synthesis of a Comprehensive Set », *Front. Virtual Real.*, vol. 2, 2021, Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2021.697504>
- [26] S. Abou-Zahra, « XR Accessibility User Requirements », 25 August 2021, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.w3.org/TR/xaur/>
- [27] « W3C », W3C. Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.w3.org/>
- [28] « Meta Quest Virtual Reality Check (VRC) Guidelines | Oculus Developers ». Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://developer.oculus.com/resources/publish-quest-req/>
- [29] « Game accessibility guidelines | A straightforward reference for inclusive game design ». Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://gameaccessibilityguidelines.com/>
- [30] T. Westin, J. Ku, J. Dupire, et I. Hamilton, « Game Accessibility Guidelines and WCAG 2.0 – A Gap Analysis », 2018, p. 270-279. doi: 10.1007/978-3-319-94277-3_43.
- [31] « Voice SDK Overview | Oculus Developers ». Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://developer.oculus.com/documentation/unity/voice-sdk-overview/>
- [32] « Wit.ai ». Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://wit.ai/>

- [33] « Meta Quest 2 : notre nouveau casque VR tout-en-un nouvelle génération | Oculus | Meta Store ». Consulté le: 16 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meta.com/fr/quest/products/quest-2/tech-specs/#tech-specs>
- [34] « Les lunettes 3D et la réalité virtuelle représentent-elles un danger pour les yeux ? » Consulté le: 18 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://mesnouvelleslunettes.fr/lunettes-3d-realite-virtuelle-danger-yeux/>
- [35] « Espace de sécurité Meta Quest 2 : manuel et guides | Meta | Meta Store ». Consulté le: 18 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meta.com/fr/quest/safety-center/quest-2/#manuals>
- [36] « Sketchfab ». Consulté le: 20 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://sketchfab.com/3d-models/low-poly-laboratory-fedc3b5df4724997ac003f7f1b9c8cca>
- [37] « CC BY 4.0 Deed | Attribution 4.0 International | Creative Commons ». Consulté le: 20 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [38] *Ralentir le débit*, (30 août 2017). Consulté le: 20 novembre 2023. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=hod4l_BEyAI
- [39] *Simulations*, (30 août 2017). Consulté le: 20 novembre 2023. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=iynIt7viQhw>
- [40] object Object, « Subtitles in Interactive Virtual Reality:Using Gaze to Address Depth Conflicts », Consulté le: 21 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/reader/196590530>
- [41] B. Agulló, M. Montagud, et I. Fraile, « Making interaction with virtual reality accessible: rendering and guiding methods for subtitles », *AI EDAM*, vol. 33, n° 4, p. 416-428, nov. 2019, doi: 10.1017/S0890060419000362.
- [42] T. Saraiva, « unity-gaze-interaction ». 15 août 2023. Consulté le: 22 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://github.com/tomazsaraiva/unity-gaze-interaction>
- [43] « How Owlchemy Labs approached accessibility in Cosmonious High ». Consulté le: 19 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gamedeveloper.com/blogs/accessible-not-utilitarian-design-for-everyone-in-cosmonious-high>
- [44] « Paris Games Week 2023 : le jeu vidéo français s'ouvre à l'inclusivité », *vert.eco*. Consulté le: 23 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://vert.eco/articles/paris-games-week-2023-le-jeu-video-francais-souvre-a-linclusivite>

Annexes

Questionnaire :

Mise en place du casque :

1. Le casque est facile à mettre : Oui ☐ Non ☐

Oui : 1 (Océane « je suppose que oui ») Non : 2

2. Le casque est : Supportable ☐ Confortable ☐ Désagréable ☐

2 supportable et 2 confortable

3. Si vous avez choisi désagréable ou supportable, pourquoi :

- Lunette
- Sensation de bué

Choix du menu :

1. Le menu est : Complicé ☐ Pas évident ☐ Simple ☐

- Simple

- Erwan : Pas évident, « ça va un peu vite, voix réduire le débit, trop d'info, son+écriture peu déranger ».
- Océane : Compliqué (pour la prise en main) mais simple dans l'esthétique/visuel

2. J'arrive à trouver les options :

Compliqué ☐ Pas évident ☐ Simple ☐

3 simple (Océane « intuitif »)

3. Le menu propose des options qui me sont accessible : On a sauté cette question

Oui ☐ Non ☐

4. Si votre réponse est Non, que manque t'il :

5. J'arrive à sélectionner les options :

Compliqué ☐ Pas évident ☐ Simple ☐

2 simple et 1 pas évident (Erwan avec l'énoncé)

Expérience :

1. Je trouve l'histoire : Complicé ☐ Pas évident ☐ Simple ☐

3 simples

2. J'arrive à réaliser les actions demander : Oui ☐ Non ☐

3 oui (océane « bulles compliqué » et Erwan « à peu près »)

3. La voix que j'entends est :

Claire ☐ Compréhensible ☐ Inaudible ☐

3 Claires et 1 Compréhensible (Erwan « trop d'informations »)

4. L'accompagnement des panneaux est :

Utile ☐ Complexe ☐ Perturbant ☐ Sans importance ☐

3 Utiles

5. L'accessibilité choisi au début est:

Cohérente ☐ Agréable ☐ Discutable ☐ Incomplète ☐

1 Cohérente et 1 Agréable

6. Réponse libre : Avez-vous un ou des conseils pour nous améliorer ?

- Revoir pour le port des lunettes
- Vertige au changement de taille (peut être avertir, fondue noir ou faire de façon plus lente). Proposer aux utilisateurs si il souhaite continuer, laisser plus de libre arbitre
- Consigne pour la goutte d'eau : laisser un temps pour s'adapter à son environnement avant l'exercice de lancer, consigne un peu rapide.
- Trop de mouvement pendant les explications (Océane a un trouble de l'attention, elle était captivée par le chat et n'a pas écouté les consignes). Elle propose de pouvoir mettre pause la voix
- Manipulation des plantes compliqués.
- Des fois textes flous

Général :

7. Je trouve l'expérience ludique : Oui ☐ Non ☐

Oui 3

8. Je trouve l'expérience accessible : Oui ☐ Non ☐

Oui 3

9. L'expérience m'a appris quelque chose : Oui ☐ Non ☐

Oui 3

10. Je trouve l'expérience simple : Oui ☐ Non ☐

Oui 3

11. Je trouve l'expérience :

Longue ☐

Courte ☐

Parfaite ☐

2 courtes et 1 parfaite

J'arrive à réaliser les actions demander	La voix que j'entends est	L'accompagnement des panneaux est	L'accessibilité choisi au début est	Je trouve l'expérience ludique	Je trouve l'expérience accessible	L'expérience m'a appris quelque chose	Je trouve l'expérience simple	Je trouve l'expérience
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui	Oui	Courtes
Oui	Claire	Utiles	Coherente	Oui	Oui	Oui	Oui	Courtes
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui	Oui	Parfaite
Oui	Comprehensible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui	Oui	Parfaite
Oui	Comprehensible	Inutile	Coherente	Oui	Oui	Oui	Oui	Parfaite
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Non	Oui	Oui	Long
Oui	Inaudible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui	Oui	Parfaite
Oui	Inaudible	Utiles	Coherente	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Claire	Inutile	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Comprehensible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Claire	Utiles	Coherente	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Parfaite
Oui	Inaudible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Parfaite
Oui	Comprehensible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Comprehensible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Parfaite
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Parfaite
Oui	Claire	Utiles	Coherente	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Comprehensible	Utiles	Agreeable	Oui	Oui avec question	Oui	Oui	Parfaite
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Claire	Utiles	Coherente	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Parfaite
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes
Oui	Claire	Utiles	Agreeable	Oui	Oui	Oui avec question	Oui	Courtes

Fichier audio

[01_Intro 2.mp3](#)

Transcription

Ah Bonjour, Bienvenue dans mon laboratoire. Je suis Louis Carole et je suis spécialiste du comportement de l'eau. D'ailleurs j'ai oublié d'arroser ma plante. Vous pouvez vous en occuper s'il vous plaît ?

Fichier audio

[02_ThumbUP 1.mp3](#)

Transcription

Ah voilà, vous voyez, elle en avait besoin. Bon, vous en avez mis un peu partout, mais vous êtes coopératif. J'aime bien ça. Je vois donc que vous allez pouvoir m'aider. Je veux calculer la taille maximale d'une goutte d'eau et c'est une expérience que je voulais faire depuis longtemps, mais j'avais besoin de rétrécir quelqu'un à l'échelle du millimètre. Formidable, ce sera vous, je vais vous réduire précisément à la taille de 10 millimètres quand vous êtes prêt, mettez votre pouce en l'air.

Fichier audio

[03_GotoMm 1.mp3](#)

Transcription

Ça y est, vous rapetissez, vous allez voir à petite échelle, l'eau a des formes différentes car la gravité n'est plus forcément la force la plus importante.

Fichier audio

[04_Mm 1.mp3](#)

Transcription

Vous voilà à la taille prévue, 10 millimètres. Vous voyez la boule d'eau devant vous ? C'est une simple goutte d'eau qui est soumise à 2 forces. La gravité qui devrait faire que l'eau fait une flaque, mais aussi une force physico-chimique exercée par les molécules entre elles et qui crée à la surface du volume une sorte de peau constituée par des molécules toutes attirées vers le centre, on l'appelle la tension de surface ou tension superficielle. C'est elle qui permet cette forme sphérique car pour le moment elle prédomine sur la gravité. Bon,

vous n'avez pas encore bien compris, vous allez essayer, ça sera plus clair. Prenez des gouttes d'eau à votre droite en fermant la main et lancez-les sur notre grosse goutte d'eau.

Fichier audio

[05 Réussite 1.mp3](#)

Transcription

Bravo, la goutte d'eau a grossi mais sans s'étaler. Continuez.

Fichier audio

[06 Réussite 2 1.mp3](#)

Transcription

Bien joué, je sens que la prochaine fois sera la bonne.

Fichier audio

[07 Réussite 3.mp3](#)

Transcription

Ah ça y est, on a atteint la limite. La sphère a commencé à s'étaler sur les côtés et je note une hauteur maximale de 3 millimètres. Ça veut dire que si vous continuez à lancer de l'eau et vous pouvez le faire, la forme de la goutte ne dépassera jamais 3 millimètres en hauteur. La goutte va continuer à se déformer jusqu'à devenir une flaque. Que s'est-il passé la gravité qui agit sur les molécules d'eau prédomine maintenant sur la tension de surface, la goutte d'eau n'est plus sphérique.

Fichier audio

[08 Merci.mp3](#)

Transcription

Merci pour votre aide, vous pouvez enlever votre casque et bon retour à la réalité.

Fichier audio

[VoixPaulMenuHead.mp3](#)

Transcription

Bonjour, j'ai quelques questions à vous poser avant de commencer l'expérience. Pouvez-vous utiliser vos mains pour l'expérience ? Si oui, mettez votre pouce en l'air ou regardez le bouton oui, sinon mettez votre pouce en bas ou regarder le bouton non.

Fichier audio

[VoixPaulMenuDV.mp3](#)

Transcription

Voulez-vous avoir des hauts contrastes et une haute luminosité ? Si oui, mettez votre pouce en l'air ou regardez le bouton oui, sinon mettez votre pouce en bas ou regarder le bouton non.

Fichier audio

[VoixPaulMenuAD.mp3](#)

Transcription

Voulez-vous utiliser l'audiodescription ? Si oui, mettez votre pouce en l'air ou regardez le bouton oui, sinon mettez votre pouce en bas ou regarder le bouton non.

Fichier audio

[VoixPaulMenuLSF.mp3](#)

Transcription

Voulez-vous utiliser de la LSF ? Si oui, mettez votre pouce en l'air ou regardez le bouton oui, sinon mettez votre pouce en bas ou regarder le bouton non.

Les règles d'or pour créer un document en français simplifié

Le français simplifié : qu'est-ce-que c'est ?

Le français simplifié, comme son nom l'indique, est une écriture simplifiée des documents, pour une meilleure compréhension du lecteur.

Le FALC (Facile à Lire et Comprendre) le permet aussi, mais ses règles sont plus strictes.

Un document en français simplifié, à quoi ça sert ?

Ecrire un document en français simplifié permet de rendre les informations contenues dans un document, plus accessibles à tous.

Ainsi, les personnes ayant des difficultés de lecture peuvent comprendre plus facilement le contenu.

Et ce n'est pas uniquement utile pour les personnes en situation de handicap ayant des difficultés de compréhension, mais aussi pour d'autres publics : personnes étrangères maîtrisant peu le français, personnes âgées, enfants...

Les règles d'écriture d'un document en français simplifié

Règles globales

- Attention à la taille du document (pas trop long)
- Numérotter les pages du document s'il y en a plusieurs
- Aérer le document

Mise en forme du texte

- Choisir une police facile à lire (par exemple Arial ou Tahoma)
- Utiliser au minimum le gras et l'italique
- Ne pas justifier à droite, justifier toujours à gauche (ce qui évite les « trous » dans le texte)
- Eviter les longues listes avec virgules
- Grandes et moyennes listes : faire avec des puces
- Utiliser une même illustration pour le même terme
- Eviter de couper les mots avec un - en fin de ligne

Contenu

- Simplifier le contenu
- Expliquer les mots compliqués avec des mots simples
- Eviter formes passives, formes négatives
- Toujours décliner les sigles

- Aller à la ligne après une idée
- Une idée par ligne ou même une phrase par ligne
- Utiliser des exemples
- Utiliser le même mot à chaque fois que vous parlez de la même chose

Dessins et illustrations

- Pas de dessin de "fond" sous le texte (comme les filigranes)
- Utiliser des photos, des dessins, symboles ou pictogrammes
- Utiliser des illustrations claires
- Si possible, utilisez le même type d'illustration sur tout le document
- Utiliser des images adaptées au lecteur (enfants/adultes)
- Utiliser des images claires, illustrant exactement ce que vous écrivez ou dites

Couleurs

- Attention aux contrastes des fonds de couleur et des écrits

Chiffres et dates

- Écrire les nombres en chiffres et non en lettres
- Ne pas utiliser de chiffres romains : XI, V
- Écrire les dates en entier : lundi 11 octobre 1999 au lieu de : 11/10/1999 ou, 11 octobre

Ne pas utiliser :

- de métaphores : « Il pleut des cordes »
- de mots d'une langue étrangère, sauf s'ils sont très connus (hamburger)
- d'abréviations, initiales, acronymes (sauf si vous les déclinez)
- de pourcentages, de gros nombres. Remplacez par : « un peu », « beaucoup »
- de notes en bas de page
- de caractères spéciaux (&, #, §)
- d'abréviations : p.ex. ou etc

Echelle	Taille main	Echelle de temps	Ce que je vois, perçois	Ce que je fais (captation de gestes)	Ce que l'avatar me raconte	Ce que l'avatar me montre (couche d'interprétation)	Autres ?	Jauges ?
mètre	Corps : 1,50 m Main : 15 cm	1	"Passthrough", des éléments virtuels apparaissent dans l'environnement réel : comme un jardin japonais, un bassin d'eau, des plantes, un tas de terre, une colonne de galets à l'équilibre improbable, des papillons qui volent... et un spray.	Arroser une plante avec le spray	Accueil et présentations. Incitation à regarder le monde autrement, à se demander d'où viennent ces formes et ces mouvements. Souvent il faut faire un pas de côté pour mieux comprendre, ici nous allons commencer par un pas dans le monde du millimètre. Consigne spray			G 100% V 10%
milli	Corps : 30mm Main : 3mm	1	Un premier changement de taille sans changement de monde. Changement progressif et perceptible. Pluie de milligouttes qui tombent doucement (on distingue déjà des microgouttes qui flottent). Fourmi qui boit une goutte d'eau. Gerris qui marche sur l'eau.	Attraper des milligouttes et les lancer pour former une grosse goutte qui va s'étaler progressivement jusqu'à couler sur une pente vers la plante. Les trajectoires sont balistiques mais perturbées par un "vent". JM vérifie que la tension de surface entraîne bien toute la flaque dans la pente. Attention au volume de la flaque : 3mm de hauteur, diamètre 10mm, ça fait 453 gouttes de 1mm de diamètre ! Ou 17 gouttes de 3mm de diamètre.	A cette échelle, la milligoutte d'eau (taille inférieure à la main) est parfaitement sphérique, une membrane élastique semble entourer les gouttes d'eau ; forces parallèles à la surface (comme des ressorts entre les molécules). Mais en grossissant, la goutte s'applatit sous l'effet de la gravité jusqu'à devenir une petite flaque. La goutte lancée a un mouvement balistique, comme une balle : après le lancer, elle tend à partir en ligne droite en raison de son inertie, tandis la force de gravité la dévie en permanence vers le bas, et que les frottements de l'air (la freinent et) peuvent la dévier légèrement. Frottements de l'air, cf Tartaglia.	- Force de cohésion centripète qui tient la goutte ronde (et les bords ronds de la petite flaque), comme si c'était un ballon de baudruche. - Champ de force gravitationnel, vertical et à longue portée (force à distance) - Lignes de mouvement de l'air et léger frottement sur les milligouttes lorsqu'elles s'y déplacent (force de contact)	- Locomotion oiseau, poisson - chute d'eau : cohésion gouttes vs déformation par frottement dans l'air - gag : l'avatar s'amuse à supprimer la gravité	G 70% V 50%
micro	Corps : 100um Main : 10um		On est porté par l'air ambiant, on flotte comme dans une mélasse invisible. L'avatar a du mal à se déplacer. Myriade de microgouttes qui flottent portées par les mouvements de l'air, comme nous.	Attraper des microgouttes et les propulser en agitant les mains tout au long du trajet de telle manière que les flux d'air portent les gouttes vers la plante. Il faut éviter des obstacles centraux, mais les gouttes ont une inertie de mouvement. On fait le choix d'ignorer que ces gestes devraient me faire bouger aussi : action-réaction.	A cette échelle, on devient très sensible aux mouvements de l'air ambiant, qui parait très dense et qui nous porte : on flotte. Notre corps a peu de masse, on est si léger que la vitesse de chute libre est plus lente que les mouvements de l'air. La force dominante est celle des frottements de l'air. Si l'on essaie de s'y déplacer, ça résiste comme dans une mélasse. La viscosité de l'air devient prédominante. De même, les microgouttes sont emportées par le moindre mouvement de l'air. Mais les microgouttes ont encore un peu d'inertie : elle réagissent au vent avec un peu de retard, et ne peuvent pas changer rapidement de vitesse ou de direction pour éviter un obstacle. Parler de l'effet important d'adhésion des microgouttes au contact d'une surface. Le bon terme : mouillage de la surface.	- Lignes de mouvement de l'air qui pousse les microgouttes - Frottement (force de contact) très fort de l'air sur la surface des microgouttes, qui les porte et les emporte dans ses déplacements.	Locomotion en milieu très visqueux : bactérie, amibe Prédominance des effets de surface.	G 10% V 100%
nano	Corps : 100nm Main : 10nm		Sensation de mouvement chaotique, de bruit. L'avatar est baloté dans tous les sens. Myriade de nanogouttes qui sont agitées dans tous les sens. A la surface d'une nanogoutte, des molécules H2O sont piégées, d'autres s'échappent. La matière apparait discontinue (atomes) et légèrement agitée.	Souffler des 100aines de nanogouttes vers la plante et guider l'essaim avec les mains (droite-gauche) en créant des mouvements d'air, et en évitant de toucher les côtés. A chaque aléa (brownien) j'en perds une partie qui soit touche une surface, soit part dans une direction aléatoire.	A cette échelle, la matière est discontinue, granulaire ; les atomes sont pour nous comme des lentilles. Ces grains s'agitent, les molécules de l'air s'entrechoquent comme des boules de billard et choquent les objets plus gros (cf mouvement brownien). Plus la masse de l'objet est petite, plus l'effet d'un choc devient perceptible >>> l'objet est mis en mouvement, de manière erratique. Les molécules d'eau, lorsqu'elles sont très proches, peuvent se lier entr elles sous l'effet d'une force intermoléculaire. Et former ainsi une goutte... ou un océan. Quand une molécule d'eau entre en collision avec la nanogoutte, elle peut s'y coller (adhésion) ; et de temps en temps, des molécules d'eau quittent la goutte sous l'effet de l'agitation. Ces grains pouvant bouger les uns par rapport aux autres, la matière est déformable : c'est ce qui définit les liquides par rapport aux solides. Un objet statique subit les collisions des molécules, dont les effets se compensent en moyenne : il en résulte une force aléatoire dont la moyenne est nulle. Quand l'objet se déplace dans le fluide , les collisions ne sont plus symétriques, la force subie reste aléatoire mais la moyenne n'est pas nulle : elle s'oppose au déplacement de manière proportionnelle à la vitesse. C'est le frottement visqueux.	- La matière solide et liquide constituée de grains. - Les molécules de l'air en mouvement aléatoire, et qui "frappent" les surfaces des corps : on comprend l'origine du "frottement" de l'air vu aux échelle micro et milli. - Force des liaisons faibles entre molécules voisines (courte portée), assurant la cohésion macro de la goutte ou encore la stiction sur une autre surface. A la surface de la goutte, ça "colle" les molécules qui passent à proximité, tandis que certaines très agitées se "décollent", équilibre dynamique de la goutte.	Bactériophage injectant une molécule d'ADN dans la bactérie "géante"	G 0% V 100%
méga	Corps : 1,50 m Main : 15 cm		Transition "vers le haut", je me retrouve dans l'espace, m'éloignant de la Terre (je la vois passer de haut en bas comme si je me retournais) et je chute jusqu'à atteindre le sol d'une comète 100 km. La gravitation est extrêmement faible. Sensation de légèreté extrême, de silence, de lenteur.	Attraper une grosse goutte gelée. La lancer devant moi dans l'objectif de la faire passer à travers un cerceau situé au-dessus de ma tête ou entre mes jambes. En visant je vois se dessiner la trajectoire précalculée selon mon angle de visée : orbite stable, chute vers le sol ou échappement au champ gravitationnel. Je ne peux pas la faire passer en tir direct, je dois faire le tour de la comète. Si lancer très faible, le projectile tombe au sol ; si trop fort, il quite le champ gravitationnel de la comète. Si bonne force, trajectoire elliptique, la goutte revient par derrière et passe dans le cercle. C'est le canan de Newton https://fr.wikipedia.org/wiki/Canon_de_Newton Option scénario inverse : il faut éviter l'effet boomerang et réussir à se débarrasser de la goutte.	A cette échelle d'objet (la comète), la force de gravité devient comparable aux forces de cohésion intermoléculaires. Ainsi, soumise à la seule gravité, même la matière solide prend une forme sphérique (observée à partir d'une taille de l'ordre de 100km). La goutte est en micro gravité : la force de gravitation exercée par la comète est faible. Dans le vide, il n'y a pas d'air donc pas de frottement visqueux, les mouvements des objets sont seulement déterminés par la gravité et l'inertie. Dans notre cas de canon de Newton, la trajectoire dépend de la vitesse initiale : - Il existe un premier seuil à compter duquel la vitesse initiale impartie au boulet est telle que celui-ci cesse de décrire une trajectoire balistique parabolique pour être satellisé sur une orbite circulaire. - Lorsque la vitesse initiale impartie au boulet est supérieure à ce premier seuil, le boulet est satellisé sur une orbite elliptique dont l'excentricité croît avec la vitesse initiale. - Il existe un second seuil — la vitesse de libération — à compter duquel la vitesse initiale impartie au boulet est telle que celui-ci cesse d'être satellisé pour suivre une trajectoire orbitale parabolique. - Lorsque la vitesse initiale impartie au boulet est supérieure à ce second seuil, le boulet suit une trajectoire hyperbolique.	- Lignes de champ gravitationnel déformées par les masses (force à distance) - Trajectoires prévisibles des projectiles. - Forces d'action-réaction (l'une vers l'avant, l'autre vers l'arrière) au moment où je lance (force de contact)	Locomotion fusée : action-réaction Des baleines qui nagent ?	G 100% V 0%
mètre	Corps : 1,50 m Main : 15 cm	1	Les plantes ont beaucoup grandi. Passthrough inverse : retour au monde réel.		Retour au point de départ. Wrap up : les mondes nano et giga ne sont pas si éloignés, on sait bien les décrire et surtout, ils permettent de mieux comprendre ce qu'on observe à notre échelle au quotidien. Remerciements et aurevoir.			"G 100% V 10%"