

SMART MUSÉUMS

Vers l'émergence de nouvelles médiations muséales

ABDELKADER BAAZIZ *

ABSTRACT: In this paper, we will show how museums explore the opportunities offered by technologies associated to virtual and augmented realities to make deep transformations towards new forms of ambidextrous organization that we call "smart museums", able to exploit various technologies to provide visitors stimulating experiences that combine information, entertainment and active participation.

We will also present how these technologies contribute to the ephemeral or sustainable digital restoration of artifacts exposed through a reverse engineering process as well as the sustainable digital preservation of World Heritage. Various technical processes are highlighted during the implementation of concrete projects of virtual and/or augmented museums.

Keywords: Smart Muséums, médiations muséales, expérience muséale immersive et/ou augmentée

1. Introduction

L'internet muséal a été identifié comme une des problématiques émergentes dans les sciences de l'information (Papy, 2008 ; Vidal, 2008). La Conférence permanente des Directeurs-trices des unités de recherche en Sciences de l'Information et de la Communication (CPDirSIC, 2018) a circonscrit le domaine « médiations mémorielles, culturelles et patrimoniales » comme l'un des dix (10) domaines ¹ dont les sciences de l'information et de la communication (SIC) ont accordé une grande attention en plaçant le concept de médiation au cœur de leur approche à travers des dynamiques de recherches menées en collaboration avec des spécialistes d'autres disciplines. Cette double reconnaissance positionne les projets muséaux dans des approches transversales et pluridisciplinaires où les SIC constituent un outil privilégié de médiation entre le sujet de l'étude et les différents acteurs qui y interviennent sur la même étude. Selon Vidal (2008), les professionnels des musées en s'appropriant les technologies interactives, inventent de nouvelles médiations et de nouveaux accès aux arts et sciences, qui traduisent la façon dont les musées pensent la circulation de leurs ressources. C'est ce que nous tenterons de mettre en exergue à travers un exposé des principales technologies de réalité virtuelle, de réalité augmentée et de réalité mixée qui constituent de nouvelles médiations et de nouveaux accès aux arts et sciences et qui traduisent la façon dont les musées pensent la conservation, la circulation et la diffusion de leurs ressources. Nous tenterons ensuite, de montrer comment les musées explorent les opportunités qu'offre cette (r)évolution afin d'opérer des transformations profondes vers de nouvelles formes d'organisation que nous appellerons génériquement « smart muséums » ², aptes à exploiter diverses technologies alliant réalité virtuelle et réalité augmentée. De ce point de vue, ces smart muséums seront de plus en plus, ambidextres au sens de March (1991). En effet, l'ambidextrie de ce type de musées, apparait d'une part, dans leur capacité à atteindre l'excellence opérationnelle dans l'exploitation de leurs activités traditionnelles de conservation et d'exposition d'artéfacts et

* Aix Marseille Univ, IMSIC, Marseille, France. Email : abdelkader.baaziz@univ-amu.fr

¹ In « Dynamique des recherches en Sciences de l'Information et de la Communication », ouvrage collectif élaboré par les membres de la CPDirSIC. Cet ouvrage propose une cartographie structurée en dix domaines pluridisciplinaires auxquels les SIC accordent une attention particulière. Le chapitre 5 de cet ouvrage (pp. 85-106), est entièrement consacré aux « Médiations mémorielles, culturelles et patrimoniales ».

² Néologisme composé de deux mots, le premier en anglais « smart » qui signifie « intelligent » faisant référence aux technologies de l'information et aux objets connectés et le second, en latin francisé « muséum » qui signifie « musée ». A notre connaissance cette appellation a été utilisé en 2008 pour désigner un projet soutenu dans le cadre du programme européen (FP7).

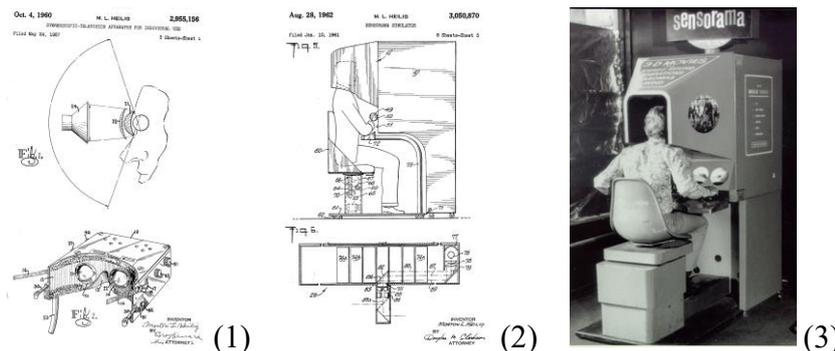
d'autre-part, à explorer tout moyen permettant de s'adapter aux transformations qu'exigent les visiteurs contemporains et dans le futur. Ces visiteurs ne veulent plus être des consommateurs passifs. Ils exigent désormais des informations, des divertissements et une participation active aux stimulations multisensorielles combinés à un design innovant (Pine et Gilmore, 1999) en moyens de diffusion et de médiation. Pour cela, les smart muséums auront pour mission de répondre aux attentes qui traduisent les trois facettes du visiteur (en tant qu'humain) : (1) homo sapiens³, humain qui sait et qui est en quête permanente d'informations et de savoir ; (2) homo ludens⁴ qui souligne l'importance de l'acte de jouer pour l'être humain, notamment pour agrémenter sa quête du savoir et enfin, (3) homo faber⁵, humain qui fabrique des outils qui lui facilite la vie notamment, ceux nécessaires à sa quête du savoir.

Nous présenterons enfin, quelques projets concrets qui illustrent les nouvelles missions de ces « smart muséums », les process et les techniques utilisés pour la conception d'expériences muséales immersives et augmentées qui contribuent à la restauration numérique des artefacts ainsi qu'à la sauvegarde numérique durable du patrimoine mondial.

2. Revue de littérature

2.1. La petite histoire de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée

Bien que le terme réalité virtuelle (VR) ait été utilisé pour la première fois par Jaron Lanier en 1987, c'est au cinématographe Morton L. Heilig que nous devons l'existence des premiers brevets de dispositifs offrant une véritable expérience VR lorsqu'il a imaginé que le public serait plus efficacement intégré dans les histoires si tous ses sens étaient stimulés (Nelson et Yam, 2014).



Figures 1. (1) Extraits du Brevet US2955156 – Stereoscopic-television apparatus for individual use (2) Extraits du Brevet US3050870 – Sensorama simulator (3) Sensorama simulator (Photo Heilig)

Heilig créa des prototypes d'un masque télé-stéréoscopique ancêtre des actuels casques de VR (Heilig, 1960) et un appareil qu'il baptisa « Sensorama », destiné à stimuler les sens d'un individu en simulant une expérience aussi proche de la réalité (Heilig, 1962). Ces dispositifs ont été conçus principalement, pour créer une expérience physiquement immersive pour les cinéphiles en leur présentant des mouvements, des senteurs et des stimulations sensorielles qui compléteraient les images diffusées sur écran. Les prétentions de Heilig (1962) allaient au-delà du spectacle cinématographique pour supposer des usages militaires, industriels et éducatifs où il présentait son invention comme le moyen d'apprentissage par excellence. Il poussa la réflexion jusqu'à la refonte totale du cinéma en théâtre d'illusions, qu'il breveta sous l'appellation « théâtre d'expérience »

³ L'espèce « Homo sapiens » est décrite par le médecin et botaniste suédois Carl von Linné (1707-1778) en 1758 dans la 10^{ème} édition de son œuvre majeure « Systema naturæ per regna tria naturæ, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis (Système de la nature, en trois règnes de la Nature, divisés en classes, ordres, genres et espèces, avec les caractères, les différences, les synonymes et les localisations) ».

⁴ « Homo ludens » est évoquée pour la première fois par Johan Huizinga (1872 - 1945) dans son ouvrage édité en 1955 « Homo ludens: A study of the play element in culture ». Elle insiste sur l'importance de l'acte de jouer pour l'être humain.

⁵ « Homo faber » est abordée par Henri Bergson, philosophe évolutionniste français (1859 - 1941) dans son ouvrage « L'Évolution créatrice » (1907). Elle fait référence à la capacité de l'être humain de fabriquer des outils.

(Heilig, 1969) et prédit que l'évolution de ces inventions donneraient naissance aux actuels cinémas immersifs (Heilig, 1992) de type XD où X désigne la dimension spatiale pour la 3D ou des dimensions sensorielles depuis la 4D.

Snapchat proposait déjà en 2015, des filtres permettant aux utilisateurs d'ajouter des masques de réalité augmentée à leurs photos et vidéos, mixant ainsi les mondes numériques avec des personnes et des environnements réels. Toutefois, c'est la sortie du jeu "Pokémon Go" en 2016 qui a indéniablement marqué le tournant le plus important de l'industrie du divertissement mais aussi, de l'histoire de la civilisation humaine. Selon Allen *et al.* (2018), son avènement constitue un "wake up call / appel au réveil" pour tous ceux impliqués dans l'industrie ou la recherche académique sur la réalité augmentée. En effet, cette application grand public a permis d'ouvrir des perspectives intéressantes pour les "serious games" et en particulier, l'introduction des technologies associées à la réalité augmentée dans divers domaines de l'économie, de l'industrie, de l'art, de la culture et de l'éducation.

2.2. Du spectre des réalités ...

La réalité virtuelle se réfère aux technologies permettant de simuler à l'aide de logiciels, un environnement existant ou imaginaire généré artificiellement avec lequel l'utilisateur peut interagir. Elle reproduit artificiellement une expérience sensorielle, visuelle, sonore et/ou haptique. Selon Fuchs (1996), la finalité de la VR est de permettre à des utilisateurs de vivre une expérience d'immersion ou pas, c'est-à-dire de mener une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. Cruz-Neira (1993) note que la VR fait référence à des expériences immersives, interactives, multisensorielles et tridimensionnelles générées par ordinateur et centrées sur l'utilisateur. Pour Diodato (2011), l'utilisateur est conscient de percevoir un espace imaginaire, il n'a pas la sensation d'expérimenter une réalité dématérialisée, mais plutôt une réalité ressentie comme autre, différente, et dans une certaine mesure semblable à un produit de l'imagination où l'utilisateur est réciproquement, spectateur et acteur : « spectateuracteur » (Boenisch, 2017).

Afin de créer des illusions d'expériences immersives dans les mondes virtuels et atteindre le sens de la présence, la VR nécessite (actuellement) ⁶ l'intégration d'une combinaison de technologies telles que les affichages visuels en 3D, les systèmes de pointage, les systèmes de géolocalisation, des dispositifs d'entrée, des systèmes sonores, des appareils haptiques, du matériel graphique et informatique ainsi que des outils logiciels (Cruz-Neira, 1993).

La définition la plus largement admise de la réalité augmentée (AR) est celle de Azuma (1997) qui soutenait que la AR comporte trois aspects importants : (1) la combinaison d'objets virtuels et réels, (2) la capacité d'interagir avec ces objets en temps réel, et (3) l'enregistrement précis des objets réels et virtuels dans un espace tridimensionnel (3D). Carmigniani et Furht (2011) définissent la AR comme une vue directe en temps réel d'un environnement physique enrichi par ajout d'informations virtuelles générées par ordinateur.

Milgram *et al.* (1994) décomposent le continuum Réalité-Virtualité en un spectre dont la réalité physique et la virtualité forment les deux extrémités :

- La réalité physique appelée aussi vie réelle ou Real-Life (RL) se réfère à l'extrémité du spectre où les utilisateurs perçoivent et interagissent avec l'environnement du monde réel.
- La réalité virtuelle (VR) se réfère à l'autre extrémité du spectre où les utilisateurs (à travers leurs avatars) sont complètement immergés dans un monde virtuel.
- La réalité augmentée (AR) superpose de l'information numérique à ce que l'utilisateur perçoit dans la réalité. En d'autres termes, l'interaction se passe dans le monde réel et elle est augmentée par la machine (ordinateur).

⁶ Les innovations technologiques étant en perpétuelle évolution, nous nous attendons à une intégration plus poussée offrant des dispositifs « tout en un » de VR et de AR.

- La virtualité augmentée (AV) fonctionne de telle sorte que l’environnement virtuel devient sensible aux informations de la vie réelle. En d’autres termes, l’interaction avec la machine est augmentée par des objets et des actions dans le monde réel comme par exemple, détecter et interpréter les mouvements et signes d’un utilisateur.
- La réalité mixée ⁷ (MR) englobe généralement toutes les nuances du spectre, autres que la réalité physique et la réalité virtuelle. La MR utilise indifféremment des éléments de la AR et de la VR.

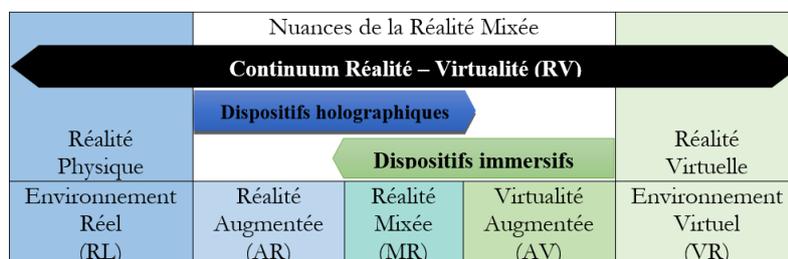


Figure 2. Le Continuum Réalité – Virtualité – Adapté de Milgram et Kishino (1994)

Pour Burdea (1993), la VR est à la fois interactive, immersive et imaginative. Si les deux premières caractéristiques de la VR sont connues, la troisième caractéristique est moins évidente. Elle est néanmoins très importante du fait que les applications qui impliquent des solutions à de vrais problèmes dont le degré de performance d'une simulation, dépend beaucoup des développeurs de la VR et donc de l'imagination humaine. De ce point de vue, la VR est un trio intégré d'immersion-interaction-imagination (Burdea, 1993). Dans la mesure où le monde virtuel n'est pas une copie exacte du réel, la VR fait appel à l'imagination. La partie imaginaire de la réalité virtuelle fait également référence à la capacité de l'esprit à percevoir des choses inexistantes.

Par opposition à l'immersion totale de l'utilisateur dans un monde constitué d'objets et d'actions virtuelles, les capacités de traitement offertes par la machine dans les systèmes de AR sont ajoutées à l'environnement réel de l'utilisateur pour l'enrichir. Partant de cette différence fondamentale, Dubois (2001) étend le triangle VR de Burdea (1993) d'un second trio AR, constitué du monde réel dans lequel évolue l'utilisateur (humain), l'enrichissement de ce monde par des capacités informatiques (machine) et enfin les interactions avec le monde réel (interaction humain – monde réel) et/ou avec le monde virtuel (interaction humain – machine).

Plus succinctement, la AR ajoute des éléments virtuels dans un environnement réel afin d'améliorer et enrichir « ce qui existe », la VR crée artificiellement un environnement réel ou imaginaire afin de représenter « ce qui pourrait exister » et enfin, la MR permet de recréer ce qui existe et de le représenter tel qu'il aurait pu exister.

D'un point de vue technologique, trois types de dispositifs permettent des expériences de réalité mixée :

- Dispositifs holographiques : caractérisés par la capacité à placer du contenu numérique dans le monde réel comme s'il était vraiment là. Ils créent de fait une réalité augmentée.
- Dispositifs immersifs : caractérisés par la capacité à créer un sentiment de présence en cachant le monde physique et le remplaçant par une expérience numérique. Ils créent de fait une réalité virtuelle.
- Dispositifs hybrides : caractérisés par la capacité de procurer une expérience inédite de réalité mixée en combinant les deux types de dispositifs holographiques et immersifs.

Kim *et al.*, (2006) ont proposé l'idée de réalité virtuelle ubiquiste (U-VR) qu'ils ont défini comme créant des environnements VR ubiquitaires qui rendent la VR omniprésente dans notre vie quotidienne. De leur point de vue, les technologies de l'information ubiquistes de la réalité virtuelle

⁷ Dans la littérature, le mot anglais « mixed » est souvent traduit par « mixte ». Ce qui suppose que la présence des deux réalités se côtoient mais leurs frontières respectives restent distinctes. Pour notre part, nous lui préférons le mot « mixée » qui suppose une impression de dilution des frontières et présage des expériences inédites et inattendues.

et de la réalité mixée, peuvent être combinées de façon transparente pour fournir aux utilisateurs un accès constant à l'information, n'importe où et n'importe quand, grâce à diverses interfaces de présentation (TV, ordinateurs, tablettes, smartphones, etc.). Pour démontrer la faisabilité cette idée, Oh et Woo (2005) ont développé un banc d'essai appelé « ubiHome » qui incorporait un certain nombre de concepts (futuristes à l'époque), tels que des visionneurs portables sensibles au contexte (ça peut être des PDA, smartphones ou tablettes), une table AR, une fenêtre immersive en réalité mixée, une smart TV (Oh *et al.*, 2005) ainsi que d'autres objets connectés. Le tout est interconnecté à une infrastructure de services intelligents, capable de les contrôler et de gérer les communications entre les différents objets.

Les premières expériences de AR dans un contexte muséal, ont été menées par Rekimoto et Nagao (1995), chercheurs chez Sony Computer Science Laboratory Inc. (Japon), qui ont développé un prototype d'un dispositif mobile « NaviCam », sensible aux situations. NaviCam identifie l'œuvre que l'utilisateur regarde et affiche les informations pertinentes sur un écran ⁸.



Figure 3. Fonctionnement de NaviCam (Rekimoto, 1997 ; Rekimoto et Nagao, 1995)

Selon Rekimoto et Nagao (1995), cette approche présente des avantages par rapport à la mise en place d'une pancarte explicative à côté d'une œuvre du fait que NaviCam est capable de générer des informations personnalisées en fonction de l'âge, du niveau de connaissance ou de la langue préférée de l'utilisateur. En effet, le contenu des pancartes explicatives dans les musées, est souvent trop basique pour les experts ou au contraire, trop difficile pour des enfants ou des visiteurs étrangers. NaviCam surmonte ce problème en affichant des informations appropriées dans la langue choisie par l'utilisateur.

Associées à des interfaces de programmation applicative (API) spécialisées de traduction automatique (telles que Google Translate), certaines applications proposent des traductions dans plusieurs langues et même des transcriptions en langue des signes, aux personnes handicapées auditives (Lesaffre *et al.*, 2014).

2.3. Et l'homo faber créa les outils du spectre des réalités ...

Dans son ouvrage « L'évolution créative », le philosophe français Henri Bergson (1907) définit le concept « homo faber » comme : « [...] l'intelligence, envisagée dans ce qui en paraît être la démarche originelle, est la faculté de fabriquer les objets artificiels, en particulier des outils à faire des outils, et d'en varier indéfiniment la fabrication » ⁹. Partant de cette définition, les environnements de développement d'applications s'inscrivent bien dans la logique de l'homo faber, de façonnage d'outils « à faire des outils », de création de nouvelles réalités virtuelles, augmentées ou mixées. En effet, pour créer du contenu VR, AR ou MR (notamment pour les musées), les développeurs ont mis au point une multitude d'outils de développement. Nous citerons ici, les plus populaires (et gratuites) :

- « Unity », un moteur de jeu multi-plateforme (Android, iOS, MacOS, Windows, consoles de jeux vidéo et web) développé par « Unity Technologies » qui propose une version gratuite sans

⁸ Ce procédé rudimentaire nous a inspiré pour insérer des codes QR pour identifier certaines figures de cet article par renvoi sur les présentations vidéo correspondantes.

⁹ H. Bergson, L'évolution créatrice, Éditions du PUF, (12ème édition 2013), 1907, p. 140.

limitation au niveau du moteur pour les étudiants et les amateurs qui veulent explorer et développer des applications non-commerciales ;

- « ARCore », une plate-forme de Google permettant de créer des expériences AR sur des dispositifs Android et iOS, grâce à ses différentes API pour permettre des expériences AR partagées ;
- « ARKit », une plate-forme de Apple permettant de créer et partager des expériences AR sur ses dispositifs iOS.

Il existe aussi des kits de développement (SDK) qui s'intègrent à des environnements de développement tels que « Microsoft Visual Studio », « Apple XCode », « Android Studio » ou « Unity 3D » pour créer du contenu VR, AR ou MR. Ces plateformes offrent au dispositif intelligent, des capacités de détecter son environnement, de comprendre le monde et d'interagir avec les informations, par l'intermédiaire de fonctionnalités de :

- Suivi de mouvement qui lui permet de comprendre et de suivre sa position par rapport au monde ;
- Compréhension de l'environnement qui lui permet de détecter la taille et l'emplacement de tous les types de surfaces 2D : horizontales, verticales et inclinées ainsi que des objets 3D connus comme les sculptures ou les meubles ;
- Estimation de la lumière qui lui permet d'apprécier les conditions d'éclairage de l'environnement ;
- Partage d'expériences AR ce qui permet à plusieurs utilisateurs de participer simultanément à une expérience AR.

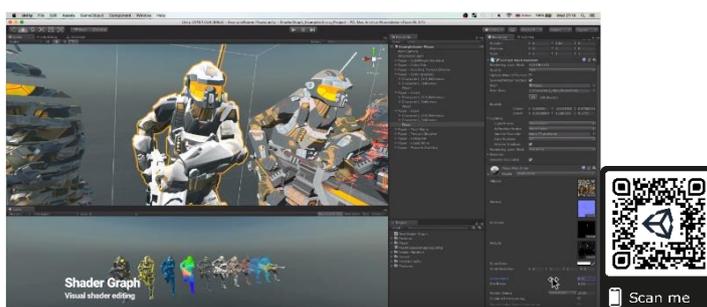


Figure 4. Environnement de développement d'applications VR, AR et MR (Photo Unity)

La création d'objets 3D censés augmenter le monde réel, se fait à l'aide de dispositifs de numérisations 3D (scanners lasers 3D, palpeurs mécaniques ou caméras 360°) ainsi que des logiciels de Conception Assistée par Ordinateurs (CAO) et des moteurs de simulation.

Les technologies AR et MR appliquées aux musées, impliquent un engagement fort de l'utilisateur à se déplacer. C'est en étant sur les lieux physiques que les expériences AR et MR prendront tout leur sens. Pour maintenir cet engagement, les applications muséales qui utilisent des technologies VR, peuvent verrouiller ces fonctionnalités qui ne se débloquent qu'à la condition d'activation de la géolocalisation.

2.4. Et l'homo ludens transforma le musée en espace de jeu ...

Une expérience muséale immersive et/ou augmentée, peut être assimilée à une interaction avec un design ludique au sens de de Valk *et al.* (2015) qui a développé un modèle « Stages of Play » décrivant l'interaction avec un design ludique au fil du temps en trois étapes : (1) l'invitation, (2) l'exploration et enfin, (3) l'immersion (Fig. 5). A l'étape d'invitation, les joueurs potentiels (dans notre cas, ce sont les visiteurs du musée) sont attirés par le design (l'expérience muséale en VR, AR ou MR). L'expérience intrigue son public et le rend curieux. Lorsqu'ils commencent à interagir avec l'expérience en se déplaçant délibérément dans des directions différentes (du musée), ils passent à l'étape d'exploration. A travers diverses actions, les visiteurs découvrent ce que

l'expérience leur procure en connaissances, en amusement et ce qu'elle leur suggère comme promesses et découvertes. Ils sont impliqués dans ce jeu exploratoire qui n'est pas encore lié à des règles précises. A ce stade, les premiers pas sont accomplis dans un espace de jeu séparé (mentalement) du monde réel dans le temps et dans l'espace (Huizinga, 1955). Le musée n'est plus (ou du moins, pas que) un lieu d'exposition d'œuvres et d'artéfacts, il devient un espace de jeu.

Les visiteurs évoluent ensuite vers l'étape d'immersion. Ils sont séduits pour rester dans cet espace. Les règles sont en cours d'élaboration et les expériences sont menées de plus en plus, selon ces règles. Cette étape peut mener à une expérience dans laquelle les visiteurs sont totalement absorbés dans le jeu qu'ils en oublient le temps et la nature première du lieu.

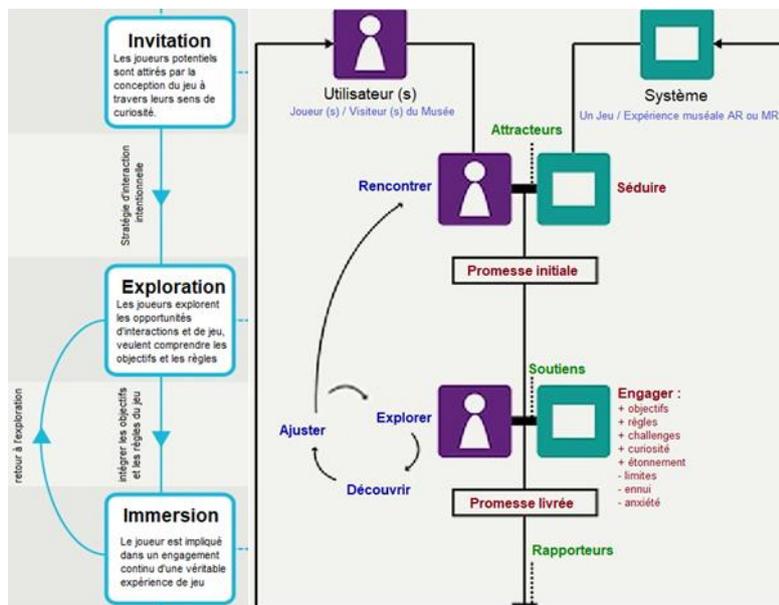


Figure 5. Les étapes du Jeu : invitation, exploration et immersion (de Valk *et al.*, 2015)

Les visiteurs ont la possibilité de retourner à l'étape d'exploration pour découvrir d'autres possibilités d'interactions ou à l'étape d'invitation si un aspect particulier de l'expérience attire leurs attentions.

2.5. L'émergence des Smart Museums

Le défi des musées au 21ème siècle réside dans leur propre existence (Falk et Dierking, 2013) dans un monde dominé par les substituts engendrés par les technologies numériques et les médias sociaux. Les musées sont également sous pression pour justifier leur existence envers le public, les bailleurs de fonds ou les gouvernements et doivent trouver un équilibre entre « être une institution de conservation » et « devenir un lieu d'expériences orientées vers les visiteurs » (Neuburger et Egger, 2018). Le musée doit donc prospecter de nouvelles pistes et réinventer ses nouvelles raisons d'existence (Priddat et Van den Berg, 2008). Ainsi, plutôt que de se concentrer sur les campagnes marketing pour augmenter le nombre de visiteurs, le musée doit se focaliser sur les motivations et les expériences des visiteurs (Falk et Dierking, 2013). Le but étant de créer des expériences positives pour les visiteurs afin qu'ils veuillent retourner au musée après leurs premières visites. Selon Baujard (2012), ce sont les visiteurs connectés qui ont initié et participé activement à ces bouleversements. En effet, la transformation profonde de l'activité muséale « du musée conservateur au musée virtuel », se matérialise principalement, par l'influence des visiteurs et de leurs pratiques numériques (Baujard, 2012).

Afin de donner du sens à leurs expériences muséales, les visiteurs cherchent à apprendre de nouvelles choses d'une manière ludique, à être étonnés par des découvertes inattendues, à discerner la face cachée des choses et accéder ainsi, au sens des artefacts exposés. Dans le meilleur des cas, le visiteur quitte le musée en pensant que c'est un lieu agréable de loisirs et

d'apprentissage, en apprenant quelque chose de nouveau et en découvrant des expériences émotionnelles (Barricelli et Golgath, 2014). Les visiteurs cherchent, avant tout une expérience d'apprentissage fortement empreinte d'émotions et de sensations, le défi étant de concilier art et délectation (Beaujard, 2012).

Selon Kaghat (2014), la visite du musée permet de mettre les personnes en contact direct avec le passé et le présent et permet également d'éveiller la sensibilité au domaine de l'art et de de l'histoire. Pour les visiteurs, une bonne expérience muséale est celle qui permet d'informer et de former, en offrant au visiteur les moyens de bien comprendre par lui-même l'œuvre exposée, ses mécanismes et de situer son rôle dans une dynamique historique, économique, sociologique et humaine. En plus de son côté pédagogique indéniable, la visite de musée suscite un intérêt émotionnel, elle peut porter une charge affective, manifestée par un sentiment de nostalgie que peut provoquer certains artefacts ou certaines parties du musée. De nos jours, la visite de musée, est devenue également une forme de distraction, grâce aux jeux qui sont proposés pour les visiteurs. En plus, la visite de musée est devenue pour les concepteurs de visites, une occasion pour saisir l'intérêt du visiteur, pour lui proposer du contenu personnalisé. Partant de ces constats, Kaghat (2014) propose cinq types de contenus pour une expérience muséale augmentée :

1. Orienter : La géolocalisation et les plans de parcours thématiques, permettent aux visiteurs de se repérer. Les éléments d'orientation doivent être définis en situation de visite et ancrés dans l'espace par des repères visuels susceptibles de structurer le parcours et de guider précisément le regard, par des points cardinaux ou des éléments visuels ou sonores.
2. Informer / Eduquer : La définition des contenus nécessite une compréhension préalable des besoins informationnels du visiteur qui peuvent être un contexte historique, le sens d'une représentation, une scène ou des symboles, l'usage d'un objet, la démarche d'un artiste, des hypothèses scientifiques et/ou des sources de questionnement possibles.
3. Etonner : La personnalisation dynamique et interactive des contenus de façon à surprendre par des informations imprévisibles et non-redondantes, encourage le visiteur à en savoir plus.
4. Evoquer : Les extraits littéraires, les citations ou les musiques d'ambiance appréciés des visiteurs, peuvent être propices à la rêverie et peuvent à l'occasion, réhabiliter la promenade au sein du musée ou au sein de certaines de ses salles.
5. Amuser : Le visiteur ne doit pas sentir qu'il est dans une classe d'école. Il est donc nécessaire que le contenu tienne compte des aspects ludiques en rendant la visite plus agréable.

3. Les nouveaux instruments de médiation pour les Smart Muséums

Bien que l'utilisation des AR comme instrument de médiation dans les musées, soit encore relativement récente, la tendance actuelle semble converger vers l'utilisation des smartphones et des tablettes, comme en témoignent les récentes recherches dans la littérature, les sites Web et les principaux magasins d'applications, notamment les téléchargements d'applications muséales disponibles (Haynes, 2018). Néanmoins, certains projets muséaux proposent d'autres dispositifs tels que les lunettes intelligentes afin d'offrir une vision combinée et cohérente d'une exposition étendue et thématique, c'est le cas par exemple des musées civiques de San Gimignano (Italie) en collaboration avec ARt-Glass.

Il se trouve que les musées ont pris conscience des avantages qu'offrent les technologies VR et AR en matière de dynamisation de leurs activités et la pérennité de leurs expositions. Ces technologies complètent le parcours physique des visiteurs par des informations inédites et confèrent une touche ludique à la visite sans encombrer physiquement l'espace d'exposition. Il devient possible aux visiteurs d'interagir avec l'ensemble des œuvres exposées préalablement numérisés. Des vignettes informatives virtuelles peuvent apporter des précisions historiques sur chacune des œuvres.



Figure 6. Expérience muséale augmentée aux « Pinacoteca Civica » à San Gimignano (Photo ART-Glass)

Afin de concrétiser le concept de « musée sans murs » imaginé par André Malraux, le musée pourrait conquérir des espaces extra-muraux tels que les musées en plein-air, les dépendances et les jardins. C’est le cas par exemple, des jardins de Versailles qui proposent une application mobile de réalité augmentée permettant de faire apparaître des informations contextualisées au-dessus des bosquets, invitant le promeneur à découvrir leurs secrets.



Figure 7. Application Jardins de Versailles (existe sur Android & iPhone)

La réalité augmentée occupe de plus en plus de place dans la visite des lieux culturels. Elle permet par exemple de visiter un même lieu du patrimoine à la fois tel qu’il est visible dans son environnement actuel et, par l’intermédiaire de la réalité augmentée, tel qu’il a été par le passé (Durand *et al.*, 2012). La AR peut être utilisée sur des objets réels pour les définir et les compléter. Elle peut aussi être utilisée comme moyen de substitution ou de remplacement des objets réels. Elle permet aux visiteurs de manipuler les objets virtuellement sans avoir besoin de voir l’objet réel. Par conséquent, ils permettent dans certaines applications de manipuler aussi les objets du musée qui ne sont pas exposés (Damala, 2009). La visite des lieux culturels peut être augmentée par la modalité visuelle, haptique, sonore, olfactive ou même affective (Kaghat, 2014).

Un musée augmentée devrait être une belle promesse de partage ludique et instructif entre amis ou en famille. Les musées qui mettent en place de jeux interactifs et quizz associés aux œuvres exposées incitent les visiteurs à se déplacer en groupe ou en famille. C’est aussi une occasion d’apprendre en y associant les enfants aux expériences ludiques qu’offrent les technologies AR, VR et MR. C’est le cas de l’abbaye de Villers-la-Ville (Belgique) qui propose à son public, un outil de visite interactif en réalité augmentée « L’ARDOISE ».



Figure 8. Un fantôme en réalité augmentée à l’Abbaye de Villers-la-Ville

Cette application offre deux modes de visites augmentées de l'abbaye de Villers. Le premier « En toute liberté », est une visite audioguide classique qui laisse le visiteur choisir les stations et contenus qu'il souhaite consulter, au fil de sa visite du site où le visiteur dispose d'une carte personnalisée pour se repérer, identifier et localiser les contenus thématiques à proximité. La seconde « Vous êtes le héros » est plus riche en fonctionnalités, avec des jeux et des animations à chaque station proposée (réalité virtuelle, réalité augmentée, vidéo, etc.) où le visiteur est projeté dans une aventure à travers les siècles. Les enfants peuvent même prendre des selfies ludiques avec Odelin, le fantôme de l'abbaye.

Des expériences similaires sont menées en France comme par exemple, le Château de Chambord en Loir-et-Cher qui offre une virée temporelle au 16ème siècle, à l'époque de François 1er. C'est le cas aussi, du Château royal de Blois qui a lancé en 2017, une expérience de visite en réalité augmentée.



Figure 9. Visite en réalité augmentée du Château de Blois (Loir-et-Cher)

Certaines technologies associées à la VR risquent d'éloigner les visiteurs des musées du fait qu'elle offrent la visualisation des œuvres d'art au travers d'images holographiques. Ce désavantage peut aussi être tourné en avantage par les musées via un marketing d'expériences plus époustouflantes que celles obtenues depuis le divan de leurs salons. Vues sous cet angle, l'AR et la VR s'inscrivent bien dans une dynamique promotionnelle de la culture muséale. De plus, les applications muséales peuvent verrouiller ces fonctionnalités qui ne se débloquent qu'à la condition d'une géolocalisation.

Indéniablement, les technologies immersives peuvent amener les personnes réticentes à la culture à s'engager dans des expériences muséales dynamiques et amusantes.

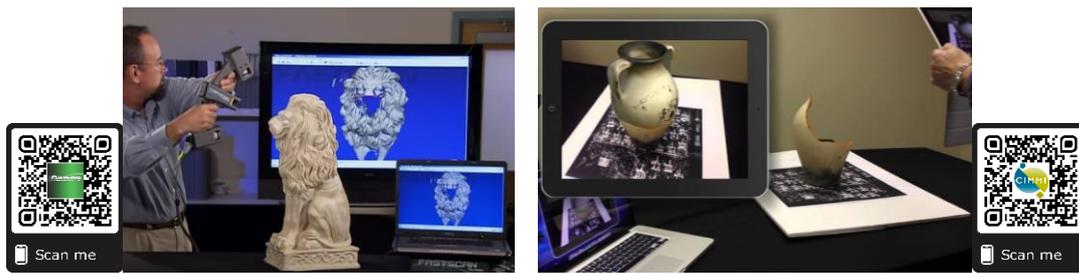
4. Restauration numérique des artefacts par processus de rétro-ingénierie

Le défaut principal de la restauration physique, est qu'une fois érigée, il est difficile de la reprendre ou de faire des ajustements. Non seulement la rétro-ingénierie de la structure risque de se baser sur des hypothèses inadéquates, souvent sans preuves historiques, mais les matériaux utilisés donneraient à l'artefact, un aspect artificiel et flambant neuf et son apparence s'éloignerait de sa forme d'origine. C'est pour cela, la restauration virtuelle éphémère est une alternative idéale permettant de modifier la rétro-ingénierie ¹⁰ à chaque fois que le besoin s'en fait sentir comme par exemple, la découverte de nouveaux indices historiques. De plus, différentes versions peuvent être réalisées pour que les visiteurs puissent comparer leurs expériences de différents rendus en fonction des hypothèses historiques émises.

La restauration numérique éphémère des artefacts selon un processus de reverse engineering d'un artefact à géométrie quelconque, consiste à extraire suffisamment d'informations à partir d'un artefact (modèle réel) afin de reconstruire un concept (modèle virtuel) par la prise d'un nuage de points issu de la surface de l'artefact à scanner numériquement par balayage laser 3D (Fig. 10.1) ou palpé mécanique (Vàrady *et al.*, 1997). Ce nuage de points est traité par des fonctions CAO permettant la reconstruction de surfaces (Baaziz *et al.*, 2014). Une fois le modèle virtuel est créé,

¹⁰ Les dénominations « rétro-ingénierie », « ingénierie inversée » ou encore, « reverse engineering » désignent la même activité qui consiste à étudier un objet pour en déterminer son fonctionnement et/ou sa méthode de fabrication.

il est possible ensuite de le modifier ou de le compléter comme c'est le cas pour la relique endommagée (Fig. 10.2).



Figures 10. (1) Scanner numérique par balayage laser 3D (Photo Polhemus) – (2) Relique restaurée virtuellement (Photo CIMMI)

5. Restauration numérique durable des objets par rétro-ingénierie

Nous pouvons imaginer dans le cas d'une visite augmentée du Musée des Arts et des Métiers, un scénario d'une expérience qui combine immersion sonore dans le musée et une augmentation visuelle dynamique des objets en mode simulation de fonctionnement. Ainsi, lorsqu'un visiteur se dirige vers un objet exposé, il entendra le son ambiant correspondant à cet objet. Le son est envoyé au visiteur d'une manière spatialisée. Le volume et l'orientation du son, dépendent de la distance qui sépare le visiteur de l'objet et de l'orientation de la tête du visiteur par rapport à cet objet. Lorsque l'utilisateur se positionne entre deux ou plusieurs objets exposés, il entend simultanément les sons ambiants de toutes les sources sonores correspondants à ces objets, tandis que chaque son est envoyé au visiteur en fonction de sa position et l'orientation de sa tête. Lorsque l'utilisateur s'approche d'un objet exposé et le fixe durant quelques secondes (spécifié au préalable), la simulation de fonctionnement en 3D se déclenche accompagné d'une description de cet objet.

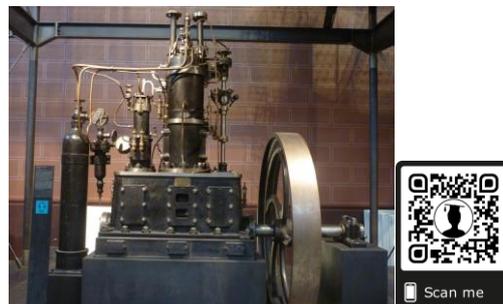


Figure 11. Musée des arts et métiers, Paris - Moteur Diesel 1896 (Photo Wikimedia Commons)

D'un point de vue technique, la conception d'un tel scénario fait appel au processus de reverse engineering d'objets complexes et composés et dont la géométrie est relativement plus simple que les artefacts artistiques. Chaque pièce composant un objet est recrée en 3D sur un système de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et montée ensuite, avec les autres pour former l'objet à reconstituer virtuellement. L'objet ainsi obtenu, est introduit dans un simulateur dans lequel, les rétro-concepteurs définissent les mouvements possibles et les conditions de fonctionnement.

Les sonorités sont ensuite, associées et synchronisées aux mouvements virtuels de l'objet (Fig. 11). Nous avons eu l'opportunité de réaliser des procédés similaires dans le cadre d'un projet dans le domaine d'ingénierie pétrolière (Baaziz *et al.*, 2014) que nous avons utilisé pour la conception des outils de forage, que nous pensons tout à fait adaptable techniquement à l'expérience muséale.

6. Restauration numérique des artefacts par projection de couleurs

La réalité augmentée permet de nouvelles formes de narrations numériques et pousse à un engagement muséal de plus en plus personnel et mobile. Grâce à des initiatives telles que le BYOD (apportez votre propre appareil), l'interaction basée sur l'écran peut être expérimentée dans le

monde réel. Mais cette approche suppose que les visiteurs du musée possèdent des smartphones pour exécuter des expériences augmentées, ainsi que l'envie de télécharger l'application nécessaire. Pour éviter cette incertitude, une approche utilisée par certains musées est la projection cartographique où le contenu numérique est projeté sur des surfaces physiques. Cette approche de réalité augmentée a déjà été proposée par Dubois (2001) qui soutenait que la AR ne nécessite pas obligatoirement la gestion par ordinateur d'une scène réaliste, puisque les données ajoutées au monde réel peuvent servir à comprendre le monde réel et se présenter par exemple sous la forme de textes. Dans ce cas, l'utilisateur est maintenu en relation directe avec son environnement réel. Le degré d'immersion de l'utilisateur dans la scène virtuelle produite par le système constitue donc le principal point de divergence entre AR et VR. Par opposition à l'immersion totale de l'utilisateur dans un monde constitué d'objets et d'actions virtuelles, les capacités de traitement des données offertes par l'ordinateur dans les systèmes de AR sont ajoutées à l'environnement réel de l'utilisateur pour l'enrichir. C'est justement cette approche qui a été utilisée dans le projet #taull1123 de restauration de l'église Sant Climent de Taüll site du patrimoine mondial situé sur le territoire de La Vall de Boí (Espagne). Sur les restes réels des peintures romanes, les peintures du musée sont projetées, exactement dans leurs lieux d'origine, qui devient une expérience de réalité augmentée sans dispositifs mobiles, pour les visiteurs mais par le biais de six projecteurs de haute qualité (Sierra *et al.*, 2015).

Le cahier des charges du projet était exigeant. Le caractère visuel et architectural de l'église devait être préservé ce qui signifie que tout équipement de projection devrait être dissimulé aux visiteurs. Compte tenu de la qualité artistique et des dimensions des fresques à projeter, il fallait une qualité d'image maximale pour les détails et les couleurs. De plus, les images projetées devaient coïncider exactement avec une surface tridimensionnelle contenant les restes de la peinture originale. Cette technique de réplique virtuelle permet de montrer l'église avec les couches profondes de peintures romanes, avec les peintures du Museu Nacional d'Art de Catalunya (MNAC) en vue et avec une reconstruction hypothétique de ce à quoi l'église aurait ressemblé en 1123. Pour combiner ces trois étapes différentes, et après une étude de la façon dont les visiteurs fréquentent l'église, il a été décidé de chronométrer les trois manières différentes afin de montrer l'église par cycles de trente minutes : trois (03 min) pour les couches profondes, dix-sept (17 min) pour les peintures du MNAC et dix (10 min) pour #taull1123 (Sierra *et al.*, 2015).



Figure 12. Les différents aspects des fresques restaurées où les peintures sont conservées y compris celles du MNAC projetées et #taull1123 (Sierra *et al.*, 2015)

Le développement de la réplique virtuelle a été réalisé par un balayage laser 3D de 3 millions de points sur l'ensemble de la zone du presbytère (un point tous les 3 millimètres). Le nuage de points résultant a ensuite été simplifié et maillé pour être utilisé comme une surface sur laquelle les photographies des fresques conservées au musée seraient superposées, ainsi que les photographies haute résolution des fresques de l'église (Sierra *et al.*, 2015).

La projection cartographique a permis aux conservateurs de restaurer numériquement des artefacts dont les détails et les couleurs ont été perdus avec le temps.

7. Sauvegarde numérique durable du patrimoine mondial

Il s'agit aussi, d'un moyen approprié pour exposer des œuvres qui ne peuvent pas sortir des réserves pour des raisons multiples et variées. La disparition d'une œuvre est bien souvent

irréversible. Mais la reproduire virtuellement est aujourd'hui une solution durable pour redonner naissance à un bien disparu que ce soit en réalité virtuelle ou en réalité augmentée. Ce qui rend possible de continuer à exposer virtuellement des œuvres prêtées, endommagées ou volées.

Le Christ dans la tempête sur la mer de Galilée de Rembrandt (1633) était conservé au musée Isabella Stewart Gardner à Boston jusqu'au 18 mars 1990, date à laquelle a été volé avec 12 autres tableaux. Il est toujours possible d'apprécier l'œuvre au même endroit grâce aux prouesses des technologies de réalité virtuelle (Fig. 13).



Figure 13. Exposition virtuelle du Rembrandt volé (Photos Musée Isabella Stewart Gardner)

Nous gardons à l'esprit que des situations catastrophiques sont vraisemblables à l'instar des actes de vandalisme perpétrés par les groupes terroristes de Daech dans les zones qu'il contrôle en Iraq, la destruction du site de Hatra ou la destruction de monuments historiques Assyriens du musée de Mossoul en 2015 et la destruction par des Talibans en 2001, des statues géantes de Bouddha à Bâmiyan en Afghanistan.

Des catastrophes accidentelles ou naturelles sont aussi probables dues aux incendies, aux inondations ou aux tremblements de terre. C'est le cas de la ville historique de Gyeongju en Corée du Sud, qui est très vulnérable aux tremblements de terre d'où l'inquiétude justifiée sur l'état des sites du patrimoine culturel et des trésors de cette ville et en particulier, le temple Seokguram datant de 1300 ans et inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1995. Il incarne une des plus belles sculptures bouddhistes du monde (Park *et al.*, 2015 ; Park et Kim, 2018). Malgré la grande importance culturelle de ce temple, le public coréen ainsi que les touristes qui visitent la région chaque année, ne peuvent y accéder. Dans des situations similaires, la réalité virtuelle peut intervenir comme la solution alternative de préservation des trésors antiques et d'offrir aux visiteurs, une occasion de vivre une expérience et d'interagir avec le temple de Seokguram malgré son isolement (Park et Kim, 2018).

La technique de balayage laser est utilisée en mesurant les coordonnées de surface 3D pour produire une réplique numérique 3D complète et à pleine échelle du temple Seokguram (Park *et al.*, 2015). De telles données collectées avec des taux d'acquisition élevés, une bonne précision et une haute densité de données 3D, permettraient de conserver l'état actuel du temple Seokguram en cas de besoin de le restaurer à l'avenir (Park et Kim, 2018). La combinaison de ces données peut être optimisée pour produire une précision géométrique et une qualité visuelle des modèles 3D texturés collectés. Pour cela, un scanner 3D a été utilisé pour capturer des données en trois dimensions de l'intérieur du temple. Ces données ont été importées dans des outils de modélisation 3D pour créer les représentations 2D et 3D.



Figure 14. Expérience Walking VR du temple Seokguram (Park & Kim, 2018)

Plusieurs systèmes immersifs ont été proposés par l'équipe chargée du projet (Park et Kim, 2018) pour offrir aux visiteurs, une expérience visuelle immersive d'objets du patrimoine culturel, tels que les écrans immersifs Ultra-Haute Définition d'une résolution 4K, le théâtre immersif basé sur une cartographie reproduisant une expérience similaire à celle du véritable temple Seokguram du fait qu'il possède la même structure et la même taille que le temple original, les casques de VR pour un environnement plus immersif et interactif ainsi que le Walking VR permettant une expérience unique d'immersion dans le temple reconstitué virtuellement à sa taille réelle (Fig. 14).

8. Conclusion

Les projets de « smart muséums » s'inscrivent pleinement dans des approches transversales et pluridisciplinaires où les sciences de l'information et de la communication, constituent un outil privilégié de médiation entre le sujet de l'étude et les différents acteurs qui interviennent sur le même sujet : conservateurs des musées, visiteurs des musées, sociologues, éducateurs, designers, concepteurs de jeux, développeurs d'applications, ingénieurs de données, rétro-concepteurs, etc. C'est ce que nous avons tenté de démontrer dans cet article où nous avons exposé les principales technologies de réalité virtuelle, de réalité augmentée et de réalité mixée. En effet, ces instruments technologiques constituent de nouvelles médiations et de nouveaux accès aux arts et sciences.

Nous avons ensuite, montré comment ces technologies permettent aux musées d'opérer des transformations organisationnelles vers des musées ambidextres capables d'assurer d'une part, leurs missions traditionnelles de conservation et d'exposition et d'autre part, de concevoir des expériences muséales stimulantes alliant information, divertissement et participation active où le visiteur est au centre en tant qu'acteur aux trois facettes : homo-sapient apprenant, homo-ludens joueur et homo-faber co-concepteur.

Enfin, nous avons présenté des exemples de projets concrets qui illustrent les nouvelles missions de ces « smart muséums » en mettant en exergue les principes, les process et les techniques utilisés pour la conception d'expériences muséales immersives et augmentées en insistant sur ceux qui contribuent à la restauration numérique éphémère ou durable des artefacts exposés ainsi qu'à la sauvegarde numérique durable du patrimoine mondial.

Références

- ALLEN P. T., FATAH GEN. SHIECK A., ROBISON D., *Urban Encounters Reloaded: Towards a Descriptive Account of Augmented Space*, In « T. Jung and M.C. tom Dieck (eds.), *Augmented Reality and Virtual Reality*, Progress in IS », Springer, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64027-3>
- AZUMA. R. T., *A survey of augmented reality*, in « Presence », vol. 6, n. 4, 1997, pp. 355-385.
- BAAZIZ A., QUONIAM L., KHOUDI A., *L'information brevet au service de l'industrie pétrolière : Cas de conception et optimisation des trépanis par ingénierie inversée*, in « Journal of Information Systems and Technology Management », vol. 11, n. 3, 2014, pp. 645-676.
- BARRICELLI M., GOLGATH T., *Historische Museen heute*, Wochenschau Verlag, Germany 2014.
- BAUJARD C., *Du musée conservateur au musée virtuel*, Editions Hermes Sciences, Lavoisier, France 2012.
- BERGSON, H., *L'Évolution créatrice*, Éditions du PUF, (12ème édition 2013), France 1907.
- BOENISCH G., *Théories de la création numérique*, Éditions Panacotta, France 2017, p. 4.
- BURDEA G., *Virtual Reality Systems and Applications*, in « Electro '93 International Conference », Edison, NJ, USA 1993.
- CARMIGNANI J., FURHT B., *Augmented Reality: An Overview*, In: Furht, B., Ed., *Handbook of Augmented Reality*, Springer, New York, USA 2011, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_1
- CPDIRSIC, *Dynamiques des recherches en sciences de l'information et de la communication*, Ouvrage collectif rédigé et édité par la Conférence permanente des directeurs-trices des unités de recherche en sciences de l'information et de la communication, Septembre 2018, <<http://cpdirsic.fr/wp-content/uploads/2018/09/dynamiques-des-recherches-sic-web-180919.pdf>> (last consulted: 14/10/2018).
- CRUZ-NEIRA C., *Virtual reality overview*, in « SIGGRAPH'93 Course Vol 23 », 1993. pp. 1.1-1.18.
- DAMALA A., *Interaction Design and Evaluation of Mobile Guides for the Museum Visit: A Case Study in Multimedia and Mobile Augmented Reality*, Thèse de Doctorat en Informatique, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France 2009.
- DE VALK, L., BEKKER, T., EGGEN, B., *Designing for social interaction in open-ended play environments*, in « International Journal of Design », vol. 9, n. 1, 2015, pp. 107-120.

DIODATO, R., *Esthétique du virtuel*, Paris, Vrin, 2011, p. 24 / p. 164.

DUBOIS E., *Chirurgie Augmentée, un cas de Réalité Augmentée : Conception et réalisation centrées sur l'utilisateur*, Thèse de Doctorat en Informatique, Université Joseph Fourier, ANRT, Grenoble, France 2001.

DURAND E., MERIENNE F., ROGER J., PERE CH., *Une implémentation de la réalité augmentée pour le patrimoine*, in « Confere 2012 », Venise, Italie 2012, pp.1-8.

FALK J., DIERKING L., *Museum experience revisited*, Left Coast Press, Walnut Creek, CA, USA 2013.

FUCHS P., *Les interfaces de la réalité virtuelle*, Les Presses de l'École des Mines, Paris, France 1996.

HAYNES R., *Eye of the Veholder: AR Extending and Blending of Museum Objects and Virtual Collections*, In « T. Jung and M.C. tom Dieck (eds.), Augmented Reality and Virtual Reality, Progress in IS », Springer, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64027-3_6

HEILIG L. M., *EL Cine del Futuro: The Cinema of the Future*, in « Presence », Teleoperators and Virtual Environments volume, Issue 3, 1992, doi: <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.279>

HEILIG L. M., *Experience Theater – Patent number US3469837*, Google Patent, USA 1969, <<https://patents.google.com/patent/US3469837>> (last consulted: 14/10/2018).

HEILIG L. M., *Sensorama simulator – Patent number US3050870*, Google Patent, USA 1962, <<https://patents.google.com/patent/US3050870A>> (last consulted: 14/10/2018).

HEILIG L. M., *Stereoscopic-television apparatus for individual use – Patent number US2955156*, Google Patent, USA 1960, <<https://patents.google.com/patent/US2955156A>> (last consulted: 14/10/2018).

HUIZINGA J., *Homo ludens: A study of the play element in culture*, Beacon Press, Boston, MA, USA 1955.

KAGHAT F. Z., *Modèle et expériences pour la visite des musées en réalité augmentée sonore. Traitement du signal et de l'image*, Thèse de Doctorat en Informatique, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France 2009.

KIM S., SUH Y., LEE Y., WOO W., *Toward ubiquitous VR: When VR meets ubicomp*, in « Proc of ISUVR », 2006.

MARCH J. G., *Exploration and Exploitation in Organizational Learning*, in "Organization Science. Special Issue: Organizational Learning", Vol. 2, n. 1, 1991, pp. 71-8.

MILGRAM P., KISHINO F., *A taxonomy of mixed reality visual displays*, in « IEICE Transactions on Information Systems », 1994.

LESAFFRE G., WATREMEZ A., FLON E., *Les applications mobiles de musées et de sites patrimoniaux en France : quelles propositions de médiation ?*, in « La Lettre de l'OCIM », n. 154, 2014, pp. 5-13.

MILGRAM P., TAKEMURA H., UTSUMI A., KISHINO F., *Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum*, in « ATR Communication Systems Research Laboratories », pages 282–292, Kyoto, Japan 1994.

NELSON F., YAM M., *The past, present, and future of VR and AR: The Pioneers Speak*, in « Tom's Hardware », 2014, <<https://www.tomshardware.co.uk/ar-vr-technology-discussion-review-32940.html>> (last consulted: 14/10/2018).

NEUBURGER L., EGGER R., *Augmented Reality: Providing a Different Dimension for Museum Visitors*, In « T. Jung and M.C. tom Dieck (eds.), Augmented Reality and Virtual Reality, Progress in IS », Springer, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64027-3_5

OH Y., WOO W., *A unified application service model for ubihome by exploiting intelligent context-awareness*, In « Ubiquitous Computing Systems », Springer, 2005, pp. 192-202.

OH Y., SHIN C., JUNG W., WOO W., *The ubiTV application for a family in ubihome*, In « 2nd Ubiquitous Home workshop », 2005, pp. 23-32.

PAPY F., *Préface*, In « Papy F. (éditeur), Problématiques émergentes dans les sciences de l'information ». Editions Hermès Science, Lavoisier, France 2008.

PARK J. H., KIM S., *Digital Representation of Seokguram Temple UNESCO World Heritage Site*, In « T. Jung and M.C. tom Dieck (eds.), Augmented Reality and Virtual Reality, Progress in IS », Springer, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64027-3_27

PARK J. H., TUFAIL M., KIM J., LEE J. H., *A Virtual Reality Platform for the 3D Representation of Seokguram Temple*, In « 2015 Digital Heritage », IEEE Xplore, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7413917>

PINE B. J. II, GILMORE J. H., *The experience economy*, Harvard Business Press, Boston, USA 1999.

PRIDDAT B., VAN DEN BERG K., *Branding Museums. Marketing als Kulturproduktion-Kulturproduktion als Marketing*, In « H. John et B. Günter (Eds.), Das Museum als Marke. Branding als strategisches Managementinstrument für Museen », Bielefeld, Germany 2008, pp. 29–48.

REKIMOTO J., NAGAO K., *The World through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments*, In « ACM User Interface Software and Technology (UIST '95) », 1995, doi: <https://doi.org/10.1145/215585.215639>

REKIMOTO J., *Navicam: A magnifying glass approach to augmented reality*, in « Presence », vol. 6, n. 4, 1997, pp. 399-412.

SIERRA A., RIU-BARRERA E., SUGRANYES T., PLUMA J., *#Taull1123: Immersive experience in a World Heritage Site (or augmented reality without devices)*, in « MW2015: Museums and the Web 2015 », 2015, <<https://mw2015.museumsandtheweb.com/paper/taull1123-immersive-experience-in-a-world-heritage-site-or-augmented-reality-without-devices/>> (last consulted: 14/10/2018).

VÁRADY T., MARTIN R. R., COX J., *Reverse engineering of geometric models - An introduction*, in « Computer-Aided Design », vol. 29, n. 4, 1997, doi : [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00054-1)

La vidéothèque en code QR

			
Google ARCore (*)	Apple ARKit (*)	Unity 3D (AR, VR et MR)	Jardins de Versailles
			
Experiences AR avec lunettes	L'Abbaye de Villers-la-Ville	Château de Chambord	Château de Blois
			
Château de Blois (Making-of)	Cleveland Museum of Art (*)	ARTLENS Gallery Cleveland Museum (*)	Smithsonian Museum of Natural History (*)
			
Scanner par balayage laser 3D	Restauration virtuelle	Présentation CAO Moteur Diesel	Musée des Art et des Métiers
			
San Climent de Taüll	San Climent de Taüll (Making-of)	Le Rembrandt volé	Le temple Seokguram

(*) Sources complémentaires sur les Smart Muséums.