

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

La réalité augmentée appliquée au patrimoine culturel une taxonomie

Gilson, Audrey

Award date:
2021

Awarding institution:
Universite de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSITÉ DE NAMUR
Faculté d'informatique
Année académique 2020–2021

**La réalité augmentée appliquée au patrimoine
culturel : une taxonomie**

Audrey Gilson



Promoteur : _____ (Signature pour approbation du dépôt - REE art. 40)
Bruno Dumas

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques.

Remerciements

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes ayant facilité la réalisation de ce mémoire, à commencer par le professeur Bruno Dumas, pour sa disponibilité et ses précieux conseils m'ayant guidée dans ma réflexion tout au long de la rédaction de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à toutes les personnes rencontrées au cours de ce parcours scolaire et particulièrement à Caroline, Thomas et Olivier pour la motivation qu'il ont su m'apporter au quotidien.

Ma reconnaissance va également à Damien, pour son soutien indéfectible, bien au-delà de ce mémoire.

Résumé

La réalité augmentée est présente et se développe dans de nombreux domaines, y compris dans le domaine culturel et artistique. Si de nombreuses taxonomies ont été développées pour la réalité augmentée, peu sont dédiées à l'application de cette technologie dans la valorisation du patrimoine culturel. Ce travail a donc pour objectif d'en développer une, axée plus précisément sur ce qu'apporte la réalité augmentée aux visiteurs de musées, galeries ou sites historiques. Après avoir exposé les taxonomies existantes et présenté de manière structurée les apports identifiés dans la littérature, une taxonomie sera développée. Celle-ci est basée sur cinq dimensions : l'immersion, la personnalisation, la (re)construction virtuelle, la communication et l'inclusion. Un classement et une analyse de 163 articles montre que la communication, la personnalisation et l'inclusion sont trois dimensions très peu représentées.

mots-clés : réalité augmentée, musées, patrimoine culturel, taxonomie

Table des matières

1	Introduction	1
2	Etat de l'art	3
2.1	Réalité augmentée	3
2.1.1	Définitions	3
2.1.2	Historique	6
2.2	Taxonomies de la réalité augmentée	9
2.2.1	Définitions	9
2.2.2	Objectifs	10
2.2.3	Taxonomies générales	11
2.2.4	Taxonomies appliquées au patrimoine culturel	19
2.3	Patrimoine culturel et apports de la réalité augmentée	21
2.3.1	Encourager la participation du visiteur	22
2.3.2	Restauration numérique et collections inaccessibles	24
2.3.3	Guide, contenu personnalisé et apprentissage	29
2.3.4	Immersion et présence	32
2.3.5	Expériences sociales	36
2.3.6	Inclusion	38

3	Taxonomie	42
3.1	Méthodologie	42
3.2	Dimensions et caractéristiques	44
3.2.1	Analyse	44
3.2.2	Présentation	50
3.3	Mise en application de la taxonomie	52
3.4	Analyse	58
3.5	Limitations	62
4	Conclusion	64
	Bibliographie	67

1 Introduction

Mise en contexte

La réalité augmentée est présente et se développe dans de nombreux domaines, y compris dans le domaine culturel et artistique. Elle devient alors un outil de médiation muséale et permet, de manière plus générale, de valoriser le patrimoine culturel quel que soit son lieu de conservation. Si la variété des dispositifs utilisés est grande, son utilisation à travers les smartphones et tablettes en favorise l'accès à un large public.

Le sujet de la réalité augmentée est largement étudié dans la littérature et de nombreuses taxonomies ont été développées afin de classer de manière représentative la diversité des systèmes existants. Cependant, chaque taxonomie l'aborde selon un axe particulier et il en existe peu dédiées à la réalité augmentée utilisée spécifiquement dans un cadre muséal. De plus, la question de l'accessibilité de ces systèmes à des personnes souffrant d'un handicap est très peu abordée de manière générale et encore moins dans le cadre des taxonomies. C'est pourquoi il est nécessaire de faire une revue des taxonomies existantes, de ce qu'elles offrent et d'en réaliser une actualisation.

Questions de recherche

L'objectif de ce mémoire est de s'interroger sur les apports de la réalité augmentée pour les visiteurs de lieux de conservation et d'exposition du patrimoine culturel. Il est alors nécessaire de s'interroger sur les bénéfices qu'apporte cette technologie aux visiteurs de musées, de galeries ou encore de sites historiques. Ce mémoire portera donc sur les questions suivantes : *Quels sont les apports de la réalité augmentée pour l'utilisateur dans le cadre de la valorisation du patrimoine culturel ? Comment développer une taxonomie reflétant ces apports ? Parmi ces apports, quels sont ceux les plus représentés ?*

Méthodologie

Afin d'y répondre, le travail s'articulera en deux parties. Premièrement, un état de l'art a été établi sur base de recherches bibliographiques réalisées en combinant les termes de recherche *augmented reality*, *museum*, *cultural heritage* et *taxonomy* dans *Google Scholar* et *Scopus* afin d'avoir une bonne couverture des différentes publications. Cet état de l'art présentera les concepts de réalité augmentée et de taxonomies, un tour d'horizon des différentes taxonomies existantes avant d'aborder les apports identifiés, illustrés d'exemples concrets d'applications. Ensuite, à la lumière des différents concepts développés dans l'état de l'art, les dimensions de notre taxonomie seront définies et une nouvelle taxonomie sera mise en place. Cette taxonomie sera appliquée à une sélection d'articles, suivi d'une analyse des résultats obtenus.

2 Etat de l'art

2.1 Réalité augmentée

2.1.1 Définitions

Il n'y a pas de définition standardisée ou convenue de la réalité augmentée [NORMAND et al., 2012]. Milgram [MILGRAM et KISHINO, 1994] situe les dispositifs visuels de réalité augmentée dans le *continuum réalité-virtualité* illustré à la Figure 1, lequel lie l'environnement réel à la réalité virtuelle. Dans un environnement réel (extrémité gauche) se trouvent exclusivement des objets réels. En y ajoutant des objets du monde virtuel coexistant avec les objets du monde réel, l'environnement devient de réalité mixte, laquelle comprend la réalité augmentée et la virtualité augmentée. A l'extrémité droite du continuum se trouve la réalité virtuelle, dans laquelle les objets qui entourent l'utilisateur sont exclusivement virtuels et il s'agit alors d'une immersion totale dans le monde virtuel. La Figure 2 illustre concrètement ce continuum.

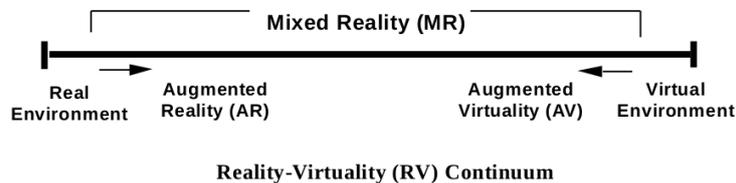


FIGURE 1 – Représentation simplifiée du continuum réalité-virtualité par [MILGRAM et KISHINO, 1994]

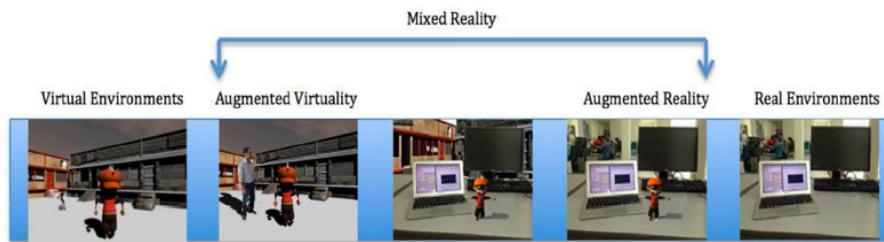


FIGURE 2 – Illustration du continuum réalité-virtualité par [KOLIVAND et al., 2018]

Azuma [AZUMA, 1997] précise que contrairement à la réalité virtuelle, la réalité augmentée permet à l'utilisateur de voir le monde réel, auquel est superposé ou sont combinés, des objets virtuels. La réalité augmentée ne remplace donc pas la réalité physique mais la complète en faisant coexister dans un même espace des objets réels et virtuels.

Azuma donne également la définition la plus largement admise de la réalité augmentée [BAAZIZ, 2018], qui est tout système présentant ces trois caractéristiques :

- combine le réel et le virtuel ;
- est interactif en temps réel ;
- s'inscrit en trois dimensions.

La réalité augmentée ne se limite donc pas à une technologie spécifique. Elle ne se limite pas non plus au sens de la vue, mais peut être potentiellement appliquée à tous les sens [AGARWAL et THAKUR, 2014].

Ces définitions de la réalité augmentée s'accordent pour dire que sa *base* est un environnement réel et l'*augmentation* est virtuelle. Rosa [ROSA et al., 2016] a une approche différente : la base de la réalité augmentée peut être réelle ou *mediated*, avec pour illustration les *see-through head-mounted displays* pour le premier cas de figure et le *video-based displays* pour le second. De plus, l'augmentation peut être un stimuli *mediated* ou virtuel (le stimuli étant entendu comme étant un *élément qui compose la perception de notre environnement*). Cinq combinaisons de base/stimuli sont alors possibles : réel/*mediated*, réel/*virtuel*, *mediated/mediated* et réel/*mediated/virtuel*. Pour compléter cette définition, il est requis que la base et l'augmentation soient en lien avec le contexte d'application et que, comme pour Azuma, le système soit interactif en temps réel.

Rekimoto [REKIMOTO et NAGAO, 1995] aborde la réalité augmentée en se basant sur l'interaction augmentée. Celle-ci est définie comme un style d'interaction homme-machine ayant pour objectif de diminuer les manipulations informatiques en utilisant des informations environnementales comme entrée implicite, permettant à l'utilisateur de porter son attention sur le monde réel et non sur l'ordinateur. La Figure 3 illustre la comparaison de styles d'interactions homme-machine, comprenant l'interaction augmentée.

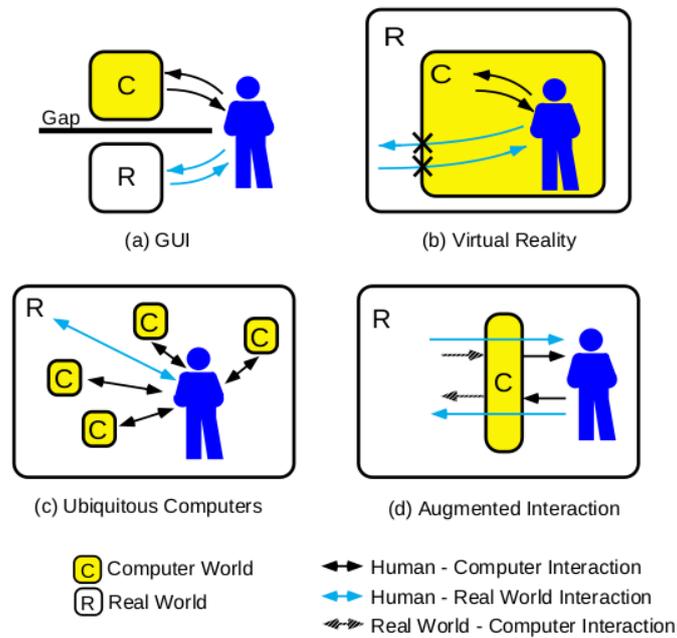


FIGURE 3 – Comparaison des styles IHM par [REKIMOTO et NAGAO, 1995]

2.1.2 Historique

Les prémices de la réalité augmentée apparaissent à la fin des années 1950 [MATUK, 2016] avec Morton Heilig et le développement du premier simulateur 3D immersif, *Sensorama* (Figure 4), décrit en 1955 dans *The cinema of the future* [CARMIGNIANI et al., 2011] et dont le prototype a été construit en 1962. Celui-ci stimulait à la fois l'ouïe, l'odorat et le toucher à travers la simulation d'une moto roulant dans Brooklyn [CIPRESSO et al., 2018].



FIGURE 4 – Le *Sensorama* de Morton Heilig

Dès 1962, Ivan Sutherland développe un projet, le *Ultimate Display*, souhaitant inclure des éléments graphiques interactifs, ce qu'on ne retrouvait pas dans le *Sensorama* [CIPRESSO et al., 2018]. C'est en 1968 qu'apparaît la première expérience de réalité augmentée générée par ordinateur [Billinghurst et al., 2015] : Ivan Sutherland et Bob Sproull développent le prototype d'un système combinant un écran à tube cathodique porté sur la tête et un système de suivi mécanique monté au plafond connecté à un ordinateur - *The Sword of*

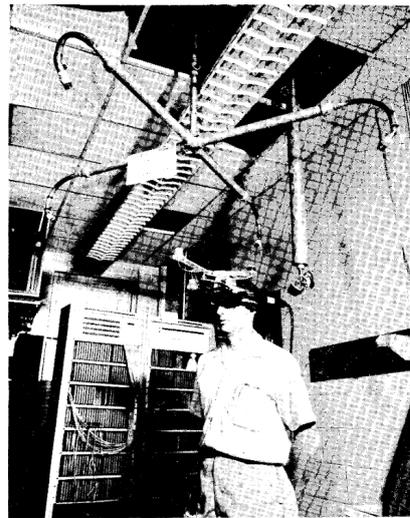


FIGURE 5 – *The Sword of Damocles* par [SUTHERLAND, 1968]

Damocles (Figure 5). Ce système créait des images en trois dimensions qui apparaissaient superposées au monde réel [SUTHERLAND, 1968]. Il s'agit du premier *optical see-through head-mounted display* [CARMIGNIANI et al., 2011].

S'en sont suivies dans les années 1970 et 1980 des recherches réalisées par divers organismes tels que l'*U.S. Air Force* ou la *NASA* [AGARWAL et THAKUR, 2014]. C'est également dans les années 1980 que les premiers dispositifs commerciaux apparaissent, avec par exemple le *DataGlove* commercialisé par VPL en 1985 qui est un gant équipé de capteurs lui permettant de mesurer la flexion des doigts, l'orientation et la position, et d'identifier les gestes des mains, le tout permettant de manipuler des objets virtuels [CIPRESSO et al., 2018].

Le terme de *Réalité augmentée* apparaît en tant que tel au début des années 1990 avec Caudell et Mizell, deux ingénieurs travaillant pour *Boeing Corporation* sur un système visant à faciliter le travail de câblage pour les employés [AGARWAL et THAKUR, 2014].

La première expérience de réalité augmentée dans un contexte muséal a été développée en 1995 par [Rekimoto et Nagao, 1995], avec le prototype *NaviCam* : un ordinateur portable doté d'une petite caméra utilisée pour filmer l'environnement de l'utilisateur y superpose les informations générées virtuellement. La reconnaissance de la situation du monde réel se fait grâce à un code-barre coloré, utilisé comme identifiant, imprimé sur une feuille de papier placée près de l'objet à identifier. Une description personnalisée est alors générée sur base des informations personnelles de l'utilisateur, en fonction de son âge, son niveau de connaissances, sa langue, etc. En 2004 le projet *ARCO*, pour *Augmented Representation of Cultural Objects*, vise à développer des technologies pour aider les musées à créer, manipuler, gérer et présenter des objets culturels numérisés dans des expositions virtuelles accessibles tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du musée [WOJCIECHOWSKI et al., 2004].

Le premier jeu mobile extérieur de réalité augmentée est *ARQuake* (Figure 6), développé par Bruce Thomas en 2000 [CARMIGNIANI et al., 2011]. Celui-ci est une extension du jeu vidéo de type FPS *Quake*, remplaçant les contrôles du clavier et de la souris par des informations de position et d'orientation, et par un dispositif d'input à deux boutons. Le joueur porte l'ordinateur portable sur son dos (Figure 7) ainsi qu'un *HMD*. *ARQuake* se jouait sur le campus de l'Université d'Australie-Méridionale [THOMAS et al., 2000].



FIGURE 6 – Exemple d'ARQuake en extérieur - [PIEKARSKI et THOMAS, 2002]



FIGURE 7 – Ordinateur utilisé pour ARQuake - [PIEKARSKI et THOMAS, 2002]

La première application de réalité augmentée pour téléphone portable, basée sur la détection de marqueurs, a été développée en 2004 [MOHRING et al., 2004], marquant le début de l'accès à la réalité augmentée par un très large public [BILLINGHURST et al., 2015]. Les systèmes de caméras pouvant analyser l'environnement physique en temps réel et lier les positions entre des objets et leur environnement sont développés en 2005. Ce type de caméra est devenu la base pour intégrer des objets virtuels avec des systèmes de réalité augmentée [CARMIGNIANI et al., 2011].

Ces dernières années, de nombreuses sociétés (telles *Microsoft*, *Google* ou *Apple*) ont investi dans le domaine de la réalité augmentée [ALIPRANTIS et CARIDAKIS, 2019]. En 2012 ont été présentées les *Google Glass* et en 2015 l'*Hololens* de Microsoft [ARTH et al., 2015].

Pokémon Go a peut-être été la première application de réalité augmentée à avoir un impact à grande échelle sur la sensibilisation du public, permettant d'initier une audience de masse à la réalité augmentée [HE et al., 2018]. Plusieurs musées ont d'ailleurs su tirer parti de cette popularité en créant des *PokéStops* et des arènes au sein de leurs bâtiments afin d'attirer des visiteurs [SHEEHY et al., 2019].

Aujourd'hui, la réalité augmentée est utilisée dans des domaines très variés (par exemple dans la médecine, le marketing, les jeux) et présente toujours de nouvelles avancées technologiques, avec un nombre croissant de systèmes de d'applications disponibles pour les utilisateurs [ALIPRANTIS et CARIDAKIS, 2019].

2.2 Taxonomies de la réalité augmentée

Après avoir défini ce qu'est une *taxonomie*, nous présenterons quels sont les intérêts de leurs développements et de leur utilisation. Nous ferons ensuite un tour d'horizon des taxonomies existantes pour la réalité augmentée, générales dans un premier temps et appliquées au domaine du patrimoine culturel ensuite.

2.2.1 Définitions

[NICKERSON et al., 2013] différencie les termes *Classification*, *Framework*, *Typologie* et *Taxonomie*, et les définit comme suit :

- **Classification** : résultat concret de l'action de mettre des objets dans des groupes ou des catégories. Un **système de classification** désigne quant à lui le regroupement abstrait ou les catégories abstraites dans lesquelles peuvent être placés des objets.
- **Framework** : est également un terme général utilisé pour l'organisation d'objets. Il peut être défini comme étant un ensemble d'hypothèses, de concepts, de valeurs et de pratiques qui constituent une façon de comprendre la recherche au sein d'un corps de connaissance.
- **Typologie** : désigne un système de regroupements conceptuels. Une typologie est généralement multidimensionnelle, la différenciant d'un système de classification, unidimensionnel.
- **Taxonomie** : peut désigner à la fois le processus, le système, et le résultat d'application du système de regroupement dérivé empiriquement ou conceptuellement de données.

Bien que ces concepts se distinguent les uns des autres par certaines nuances dans leurs définitions, ils ont tous pour but de regrouper, classifier et organiser des objets. C'est pourquoi je prends la liberté, dans le cadre de ce travail, de considérer qu'ils représentent le même concept de taxonomie. [FULLER et al., 2007] donne une définition très générale d'une taxonomie, qui est *un système de classification qui est ordonné d'une manière ou d'une autre*. D'après [NICKERSON et al., 2013], une taxonomie est

constituée de dimensions ayant chacune des caractéristiques exclusives (un objet ne peut avoir deux caractéristiques différentes dans une dimension) et collectivement exhaustives (chaque objet doit avoir une caractéristique dans une dimension), ce qui revient à dire que chaque objet a exactement une des caractéristiques dans chaque dimension.

2.2.2 Objectifs

La raison d'être des taxonomies est multiple. Tout d'abord, elles permettent de fournir une structure et une organisation à la connaissance d'un domaine et de cette manière de caractériser et classifier les systèmes, de réalité augmentée dans le cas présent. Cette classification permet de comparer les différentes technologies et méthodologies utilisées [BRAZ et PEREIRA, 2008] et de mettre en évidence les différents facteurs qui distinguent un système (de réalité augmentée) d'un autre [MILGRAM et al., 1995]. Elle permet également aux chercheurs d'étudier les relations entre les concepts et, par conséquent, d'émettre des hypothèses sur ces relations [GLASS et VESSEY, 1995]. En effet, le rôle et la gestion des taxonomies dans la recherche sont importants, la classification des objets aidant à la compréhension et l'analyse de domaines complexes [NICKERSON et al., 2013]. De plus, les taxonomies permettent de mettre en évidence les possibilités pouvant encore être pleinement exploitées dans un domaine spécifique en identifiant les opportunités pour de nouvelles applications, de fournir un aperçu des principaux domaines d'adoption de la technologie ou encore d'identifier une nouvelle application comme étant novatrice [PUCIHAR et KLJUN, 2018].

Les cadres de classification des systèmes de réalité augmentée sont nombreux. Ils peuvent être généraux, c'est-à-dire ne s'appliquer à aucun domaine en particulier, ou au contraire être plus spécifiques, par exemple [RÖLTGEN et DUMITRESCU, 2020] proposant une classification de la réalité augmentée utilisée dans le domaine industriel. De plus, les taxonomies peuvent avoir des approches très différentes d'une même technologie : dans le cadre de la réalité augmentée, il existe des taxonomies orientées technique, utilisateur, se centrant plutôt sur l'information ou encore sur l'interaction [BROCKMANN et al., 2013].

2.2.3 Taxonomies générales

Nous allons maintenant présenter plusieurs cadres permettant de classifier les systèmes de réalité augmentée.

Hugues [HUGUES et al., 2011] propose une taxonomie fonctionnelle pour la réalité augmentée et met en avant le fait que ce n'est pas la réalité qui est augmentée mais bien la perception que nous avons de cette réalité. Cette taxonomie, pour laquelle seuls les dispositifs visuels sont concernés, comporte deux grandes subdivisions, reflétant d'un côté la nature de la perception augmentée de la réalité et l'artificialité de l'environnement de l'autre :

- La *perception augmentée* de la réalité : le système de réalité augmentée apporte à l'utilisateur des informations additionnelles sur l'environnement physique. Cette fonctionnalité est subdivisée en fonction du degré d'intégration du contenu virtuel avec l'environnement physique : documentation augmentée, réalité avec perception ou compréhension augmentée, association perceptuelle du réel et du virtuel, association comportementale du réel et du virtuel, substitution du réel par le virtuel;
- La création d'un *environnement artificiel* : le système de réalité augmentée fournit à l'utilisateur des informations supplémentaires qui ne sont pas liées à l'environnement physique, permettant une immersion de l'utilisateur dans un environnement artificiel. Cet environnement artificiel peut être : imaginer la réalité telle qu'elle pourrait être dans le futur, imaginer la réalité telle qu'elle était dans le passé ou imaginer une réalité impossible.

Plusieurs classifications se sont intéressées aux systèmes collaboratifs. Rénévier [RENEVIER et NIGAY, 2001] définit les systèmes de réalité augmentée collaboratifs comme étant des *systèmes dans lesquels l'augmentation de l'environnement réel d'un utilisateur se produit par les actions d'autres utilisateurs et ne repose plus sur des informations pré-stockées par l'ordinateur*. En tenant compte de la distance entre les utilisateurs, celle entre les utilisateurs et l'objet de la tâche dans le monde réel, et du

fait qu'au moins un des utilisateurs doit être physiquement près de cet objet, il divise les systèmes de réalité augmentée collaboratifs en trois classes :

- *Collaboration à distance dans une réalité augmentée* : au moins un utilisateur est physiquement à côté de l'objet de la tâche et certains utilisateurs sont distants ;
- *Collaboration à distance en réalité augmentée* : il y a plusieurs objets des tâches, reliés à distance entre eux et physiquement présents dans différents sites. Chaque utilisateur effectue des actions sur son propre objet physique de la tâche ;
- *Collaboration locale dans une réalité augmentée* : tous les utilisateurs sont positionnés ensemble à côté de l'objet de la tâche.

Wang [X. WANG et DUNSTON, 2006] propose une taxonomie également orientée collaboration avec la réalité augmentée, et plus précisément basée sur le concept de collecticiels, définis comme étant des *systèmes informatiques qui soutiennent des groupes de personnes engagées dans une tâche (ou un objectif) commun et qui fournissent une interface vers un environnement partagé*. En considérant, tout comme Rennevier, qu'au moins un utilisateur doit être physiquement à côté de l'objet augmentée, il identifie trois facteurs dont il faut tenir compte pour classifier des systèmes de réalité augmentée (appliqués au domaine de la construction initialement, mais pouvant être étendus à une utilisation plus large) :

1. La *mobilité* : la distinction est faite entre les systèmes fixes et les systèmes mobiles utilisant la localisation de l'utilisateur ;
2. Le *nombre d'utilisateurs* : le système peut être utilisé par un seul utilisateur ou être collaboratif. Une précision est apportée quant au fait qu'un système peut être multiutilisateurs sans pour autant être collaboratif ;
3. L'*espace* : en cas de système collaboratif, les utilisateurs peuvent soit être physiquement situés dans le même espace (*collocated*) soit être séparés géographiquement et collaborer à distance (*distributed*).

La combinaison de ces trois dimensions est illustrée en Figure 8.

Number of users \ Mobility	Mobility		Mobility \ Space
	Stationary	Mobile	
Single	1	4	—
	—	—	—
Collaborative	2	5	Collocated
	3	7, 8	Distributed

<ul style="list-style-type: none"> • 1 — Single Stationary AR System • 2 — Collaborative Stationary Collocated AR System • 3 — Collaborative Stationary Distributed AR System • 4 — Single Mobile AR System • 5 — Collaborative Mobile Collocated AR System 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 — Collaborative Mobile Distributed AR System • Highlighted Square — Collaborative AR between one stationary user (office) and one mobile user (field): <ul style="list-style-type: none"> ▪ 7 — information flows from field to office where the AR task is undertaken ▪ 8 — information flows from office to field where the AR task is undertaken
--	---

FIGURE 8 – Les catégories des systèmes de réalité augmentée collaboratifs par [X. WANG et DUNSTON, 2006]

Brockmann [BROCKMANN et al., 2013] reprend des éléments de la taxonomie de Wang pour en proposer une nouvelle, toujours destinée aux systèmes collaboratifs et se voulant plus adaptée aux nouvelles technologies disponibles. Sa classification comporte six dimensions, chacune subdivisée en différentes caractéristiques (appelées *manifestations*) :

1. L'*espace* : cette dimension reprend le même concept que celle de Wang, à savoir indiquer si les utilisateurs sont au même endroit en utilisant l'application ou pas. A été ajouté la notion d'espace *variable*, dans lequel se retrouvent les systèmes pouvant être à la fois utilisés au même endroit ou à distance ;
2. Le *temps* : cette dimension indique si un système est *synchrone* ou *asynchrone*. Il est qualifié de *variable* s'il est les deux à la fois ;
3. La *mobilité* : est également reprise de la taxonomie de Wang, indiquant si le système est fixe ou mobile (ou *mixte* si un utilisateur est lié à un certain endroit tandis que les autres utilisateurs peuvent se déplacer librement) ;
4. Le *contenu virtuel* : précise si l'élément virtuel affiché est la représentation de l'utilisateur, un objet ou les deux ;
5. Le *concept de rôle* : dans le cadre d'une application collaborative, tous les utilisateurs peuvent avoir accès aux mêmes fonctionnalités (ils ont donc le même rôle) ou avoir des fonctionnalités, et donc des rôles, différents. C'est que qui est mis en évidence avec cette dimension ;

6. Le *matériel de visualisation* : cette dernière dimension permet de préciser le matériel utilisé pour permettre la visualisation. Seul des dispositifs visuels sont donc envisagés.

Si ces taxonomies se concentrant sur les applications collaboratives s'intéressent, naturellement, par certains aspects, aux utilisateurs, d'autres sont plutôt axées sur les dispositifs et se concentrent sur leurs caractéristiques techniques.

C'est le cas de celle présentée par Milgram [MILGRAM et al., 1995], qui se limite strictement aux dispositifs visuels. Le point de départ de cette taxonomie est le continuum réalité/virtualité présenté au point 2.1.1 et le constat que celui-ci ne permet pas de mettre en évidence les différents facteurs qui distinguent un système de réalité augmentée d'un système de virtualité augmentée. L'idée est alors de représenter l'environnement principal du système (de réalité ou de virtualité augmentée) en termes d'un hyperespace multidimensionnel. Seules trois propriétés importantes de cet hyperespace sont sélectionnées : la réalité, l'immersion et le caractère direct d'un système. Sur base de ces trois propriétés, une taxonomie tridimensionnelle est proposée, chaque dimension étant un continuum :

- "*Extent of World Knowledge*", *EWK* : est un continuum faisant référence à ce qui est connu par l'ordinateur à propos du monde réel. Il s'étend d'un monde non modélisé à un monde entièrement modélisé. La position d'un environnement sur le continuum réalité-virtualité coïncide avec sa position sur le continuum *EWK*, les deux concepts évoluant parallèlement (Figure 9);
- "*Reproduction fidelity*", *RV* : est la qualité de reproduction des images des objets affichés (concerne tant les objets réels que virtuels);
- "*Extent of Presence Metaphor*", *EPM* : est la mesure dans laquelle l'observateur a un sentiment de *présence* dans la scène affichée (voir point 2.3.4).

Normand [NORMAND et al., 2012] présente une taxonomie technique décrite sur quatre axes :

1. *Tracking* : représente le nombre de degrés de liberté requis par l'application et les exigences de précision spatio-temporelles. Cet axe se divise lui-même en quatre classes, selon le degré de liberté. Les applications *0D* sont celles pour

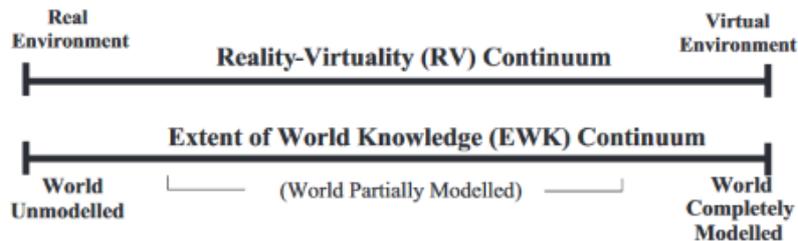


FIGURE 9 – Parallélisme des deux continuums - [MILGRAM et COLQUHOUN, 1999]

lesquelles un marker est scanné et le contenu affiché n'a pas de lien avec le monde réel. Les applications $2D$ sont celles de localisation, qui fournissent des informations sur un lieu donné et les $2D+0$ est la même que la précédente, avec l'ajout de la direction relative affichée à l'utilisateur. Enfin, avec les applications $6D$ différents types de capteurs peuvent être utilisés individuellement ou de manière combinée ;

2. *Type d'augmentation* : distingue deux possibilités, à savoir l'augmentation par médiation (qui se divise elle-même en deux catégories, selon le dispositif utilisé, *optical see-through* ou *video see-through*) et l'augmentation directe (ou réalité augmentée spatiale) ;
3. *Base temporelle* : cette dimension concerne le contenu de l'application. Elle permet de la classer selon la base temporelle du contenu affiché (il peut être situé dans le passé, le présent, le futur ou être totalement imaginaire). Cette dimension fait écho à l'*environnement artificiel* de [HUGUES et al., 2011] ;
4. *Rendering modalities* : cet axe permet de tenir compte des interactions multimodales. La dimension de tracking décrite ci-dessus étant directement liée aux applications visuelles est adaptée en fonction des modalités utilisées par le système.

Braaz[BRAZ et PEREIRA, 2008] a également développé une taxonomie technique, laquelle est établie sur base du postulat que tout système de réalité augmentée est constitué potentiellement de six sous-systèmes. Ces six sous-systèmes correspondent aux différentes parties d'une architecture d'un système typique de réalité augmentée pour les dispositifs visuels, tel que représenté en Figure 10. Si cette

taxonomie est potentiellement applicable à tous les dispositifs, quelles que soit les modalités utilisées, elle se concentre essentiellement sur les dispositifs visuels. Les sous-systèmes identifiés et utilisés en tant que dimensions sont les suivants :

1. *Acquisition du monde réel* : sous-système responsable d'acquérir des données du monde réel, il peut s'agir des yeux de l'utilisateur comme d'une caméra et concerne les cinq sens humains ;
2. *Générateur du modèle virtuel* : génère l'objet virtuel. Ce sous-système est décomposé selon les sens excités par cet objet ;
3. *Mélange des réalités* : mixe le monde virtuel au monde réel, se concentre sur la technologie utilisée ;
4. *Affichage* : pour afficher la visualisation augmentée. Il y a donc une distinction qui est faite entre les dispositifs d'acquisition de ceux d'affichage ;
5. *Manipulation du monde réel* : cette dimension est utilisée pour identifier des dispositifs haptiques ;
6. *Tracking* : décrit les caractéristiques techniques utilisées pour permettre au système de connaître la position de l'utilisateur et des objets environnants.

Chacun de ces sous-systèmes est décrit à l'aide de différents champs, utilisés dans l'application web développée pour enregistrer et caractériser les systèmes de réalité augmentée. Cette application, ainsi que les systèmes enregistrés, semblent cependant ne plus avoir été mise à jour depuis de nombreuses années.

Si elle se veut adaptée à toutes les modalités possibles pour un dispositif, cette taxonomie proposée par Braz assume également de développer particulièrement, à travers les champs disponibles, les caractéristiques propres aux systèmes visuels. Lindeman [LINDEMAN et NOMA, 2007] a une toute autre approche pour classifier les systèmes de réalité augmentée. Le système de classification présenté permet de les décrire sur base de deux critères : le sens concerné par l'augmentation (visuel, auditif, haptique, olfactif ou gustatif) et l'endroit où a lieu la rencontre entre les stimuli du monde réel et ceux générés informatiquement. Cet endroit se situe dans un continuum allant de l'environnement physique au cerveau humain. La figure 11 illustre ce continuum à travers des exemples concrets de technologies de réalité augmentée (existantes ou envisagées) placées dans ce cadre de classification. Il est important de

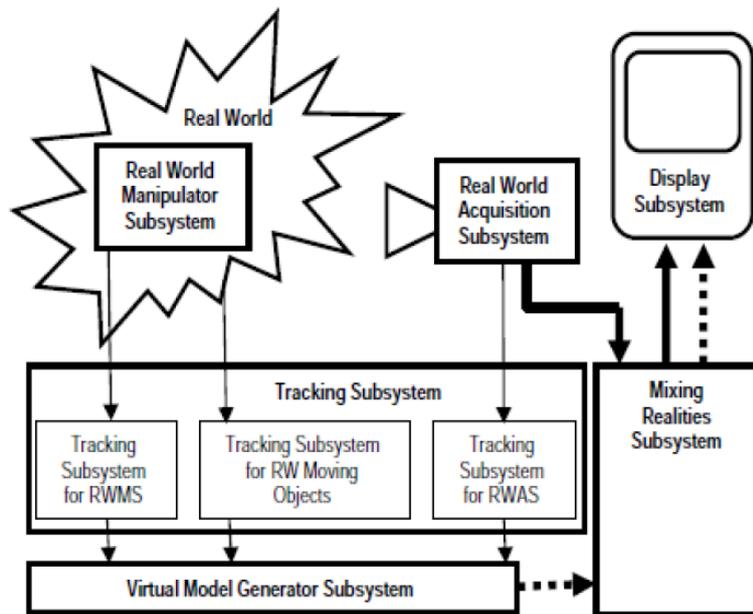


FIGURE 10 – Architecture d'un système typique de réalité augmentée d'après [BRAZ et PEREIRA, 2008]

noter que bien qu'elle ait été pensée pour chaque sens individuellement, cette taxonomie n'est pas adaptée aux systèmes multimodaux.

Enfin, Mackay [MACKAY, 1998] s'intéresse davantage à la cible de l'augmentation. Celle-ci se divise en trois stratégies fondamentales :

- Augmenter l'*utilisateur* : l'utilisateur (trans)porte un dispositif, généralement sur la tête ou dans les mains, pour obtenir des informations sur des objets physiques ;
- Augmenter l'*objet physique* : l'objet physique est modifié, en y incorporant des dispositifs d'entrée, de sortie ou de calculs ;
- Augmenter l'*environnement* autour de l'utilisateur et de l'objet : ni l'utilisateur ni l'objet ne sont directement affectés, mais des dispositifs indépendants fournissent et collectent des informations sur l'environnement, affichent des informations sur les objets et saisissent des informations sur les interactions de l'utilisateur avec ces derniers.

		Location of Mixing		
		Environment	Sensory Subsystem	Computer
Sense	Visual	Optical-See-Through [3], HMPD [7], Projectors [2]	Retinal Display [14]	Video-See-Through [1]
	Audio	Speakers	Acoustic-Hear-Through	Microphone-Hear-Through
	Haptic	3D Printer	Actuated Stylus, Heating Pad, Vibrotactile Suit [9]	Exoskeleton
	Olfactory	Odor Emitter, Air Canon [16], Wearable [15], [13]		Mask-Based Display [6]
	Gustatory	Food-Mixing Device [5], Edible Bits [10]	Taste-Tube in Mouth	Feeding Tube in Mouth [8], Tongue patch

FIGURE 11 – Taxonomie de la réalité augmentée par [LINDEMAN et NOMA, 2007]

Pour résumer

De nombreuses taxonomies ont été développées afin de classifier les systèmes de réalité augmentée. L'angle sous lequel cette classification est abordée peut être très différent d'une taxonomie à une autre et nous montre qu'un même système peut être approché de multiples manières. Cette diversité met également en avant la difficulté de refléter dans une taxonomie la pluralité des caractéristiques liées à chaque système.

Chaque taxonomie a donc un axe particulier : celles de Wang, Brockmann et Renier sont destinées aux systèmes collaboratifs et se concentrent essentiellement sur les utilisateurs et leurs positions dans l'espace et le temps ; Milgram, Normand et Braaz ont une approche beaucoup plus technique s'intéressant aux caractéristiques techniques du système ; Lindeman se base sur le sens concerné par l'augmentation et le lieu de mélange des stimuli et celle de Mackay s'axe sur la cible de l'augmentation. La majorité des taxonomies présentées ci-dessus sont applicables uniquement à des dispositifs visuels de réalité augmentée. Si quelques-unes tiennent compte de modalités non visuelles (Lindeman, Braaz), une seule permet de tenir compte des systèmes multimodaux (Normand).

2.2.4 Taxonomies appliquées au patrimoine culturel

Outre ces taxonomies générales que nous venons de présenter, il existe des taxonomies destinées aux systèmes de réalité augmentée qui sont utilisés dans un contexte bien spécifique. Nous nous intéressons ici à celles utilisées dans le cadre du patrimoine culturel. Nous avons relevé deux taxonomies de la réalité augmentée appliquée au patrimoine culturel.

La première est celle présentée par Foni [FONI et al., 2010], laquelle distingue les différentes approches pour constituer une représentation visuelle d'un objet du patrimoine culturel, englobant à la fois les technologies de réalité augmentée et de réalité virtuelle. Comme l'illustre la Figure 12, le cadre de cette classification se base sur quatre dimensions :

1. le continuum considérant la *quantité de virtualité* présente dans une représentation visuelle, se basant sur [Milgram and Kishino 1994] ;
2. le *degré d'interactivité* que représente une visualisation donnée, permettant aux utilisateurs d'avoir une interaction en temps réel avec l'objet visualisé ;
3. le continuum de la *cohérence visuelle* et de précision, reflétant le réalisme de l'objet représenté ;
4. le degré d'*automatisme*, ou la durée du cycle du développement nécessaire pour mener à bien un projet de visualisation.

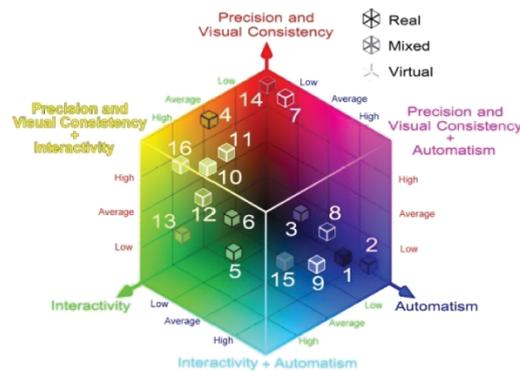


FIGURE 12 – Espace taxonomique à 4 dimensions pour la représentation visuelle par [FONI et al., 2010]

La seconde est celle de Pucihar [PUCIHAR et KLJUN, 2018]. Celle-ci se base sur le travail de Tillon [TILLON et al., 2011], qui propose un modèle d'activités pour la visite d'un musée, d'une galerie d'art ou d'un site archéologique. Ce modèle est basé sur deux activités :

- l'activité *analytique* : description qui se concentre sur l'œuvre d'art dans son contexte de création. Elle inclut trois sous-activités (description précise, objectification et émergence de questions);
- l'activité *sensible* : permet aux visiteurs d'être plus sensibles aux impressions en voyant une œuvre d'art. Cette activité est constituée de trois types de stimuli : immersion, imprégnation et imagination.

Pucihar étend ce modèle en y ajoutant deux activités :

- l'activité de *communication* : celle-ci comprend la communication entre l'institution et le visiteur, la communication entre visiteurs et la communication avec le monde extérieur;
- l'activité de *personnalisation* : englobe la personnalisation du contenu, la planification de la visite et l'engagement personnalisé avec des artefacts.

Chaque activité se voit attribuer un score allant de 1 (minimal) à 3 (élevé). La taxonomie proposée est basée sur ces quatre activités et sur le type de technologie utilisée (*handheld*, *spatial*, *mirror* ou *HMD*) (le tableau d'évaluation utilisé est illustré en Figure 13 et l'illustration du résultat en Figure 14) .

	Type of technology (Handheld, Spatial, Mirror or HMD)	MODEL			
		Analytical Activity Support score (1-3)	Sensitive Activity Support score (1-3)	Communication Activity Support score (1-3)	Personalization Activity Support score (1-3)
System 1
...

FIGURE 13 – Tableau d'évaluation pour un système de réalité augmentée par [PUCIHAR et KLJUN, 2018]

Cette deuxième taxonomie a une approche très différente de la première. En utilisant ces *activités* comme dimensions, elle permet de se détacher de l'aspect technique de la première taxonomie, qui reprend principalement des dimensions qui se retrouvent également dans des taxonomies générales et ne permet pas de mettre en avant les spécificités des applications développées pour le patrimoine culturel.

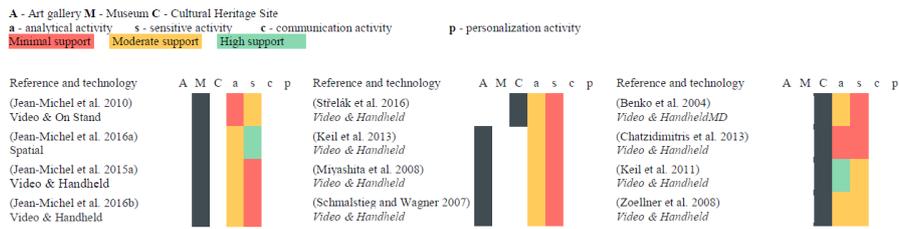


FIGURE 14 – Résultat (partiel) de l’application de la taxonomie par [PUCIHAR ET KLJUN, 2018]

2.3 Patrimoine culturel et apports de la réalité augmentée

Avant tout, il est nécessaire de définir ce qui est entendu par *patrimoine culturel*. D’après l’UNESCO [UNESCO, p. d.], le *patrimoine culturel* se compose comme suit :

- le patrimoine culturel *matériel* :
 - *mobilier* (peintures, sculptures, monnaies, instruments de musiques, armes, manuscrits)
 - *immobilier* (monuments, sites archéologiques)
 - *subaquatique* (épaves de navire, ruines et cités enfouies sous les mers)
- le patrimoine culturel *immatériel* (traditions orales, arts du spectacle, rituels)

Nous nous intéresserons aux applications de réalité augmentée destinées à valoriser le patrimoine culturel, que ce soit au sein de musées et galeries ou en plein air.

La croissance rapide des applications de réalité augmentée en a fait une méthode bien établie de diffusion et de communication de contenus liés au patrimoine culturel [BLANCO-PONS, CARRIÓN-RUIZ, DUONG et al., 2019]. Cette technologie, qui devient un outil utile et accessible [KRZYWINSKA et al., 2020] fait partie des technologies qui transforment la médiation et modifie l’expérience d’une visite au musée, à la galerie, sur un site historique. La médiation fait référence aux outils et systèmes

utilisés par les institutions pour favoriser la rencontre entre le public et le contenu. L'objectif d'une application de médiation est donc de rendre intelligible un objet/-lieu/itinéraire et de réduire ainsi la distance psychologique qui le sépare du visiteur. Une visite de musée est une expérience personnelle, subjectivement esthétique, entre le visiteur et l'œuvre, censée renforcer le contact avec l'objet. L'objectif de la médiation, sous quelque forme que ce soit, est de faciliter cette expérience en rapprochant le visiteur du contenu. Les applications de médiation numérique sont destinées à façonner l'interaction visiteur/exposition en favorisant l'absorption cognitive et la compréhension des objets ou des œuvres [ROEDERER et al., 2020]. Une caractéristique importante de la réalité augmentée est qu'elle permet d'accéder et de présenter les informations dans un contexte spécifique et à un endroit pertinent dans le monde réel [AMAKAWA et WESTIN, 2018].

Les apports de la réalité augmentée dans le contexte du patrimoine culturel sont multiples : encourager la participation du visiteur, restaurer numériquement des collections ou lieux inaccessibles, servir de guide, fournir du contenu personnalisé, favoriser l'apprentissage, fournir des possibilités d'expériences sociales, permettre la création de contenu, favoriser l'immersion et favoriser l'inclusion des personnes souffrant d'un handicap. Ces différents aspects sont développés ci-dessous.

2.3.1 Encourager la participation du visiteur

De par plusieurs aspects, la réalité augmentée permet d'encourager le visiteur à découvrir le patrimoine culturel, quel que soit son lieu de conservation. La réalité augmentée, tout comme la réalité virtuelle, s'inscrit dans une dynamique promotionnelle de la culture muséale [BAAZIZ, 2018]. Les technologies de réalité augmentée appliquées aux musées impliquent un engagement fort de l'utilisateur à se déplacer, car c'est en étant sur les lieux physiques que l'expérience prendra tout son sens [CARMIGNIANI et al., 2011] et de cette manière, elle permet d'engager l'utilisateur dans une participation active plutôt que dans une consommation passive [KLJUN et al., 2018]. La réalité augmentée peut aussi avoir un aspect attractif pour un visiteur espérant profiter, grâce à la réalité augmentée, d'une visite novatrice et plus intéressante qu'une visite traditionnelle [RECUPERO et al., 2019]. De plus, l'utilisation de la

réalité augmentée dans des musées encourage les utilisateurs à se renseigner sur les différentes ressources qui lui ont été présentées. [GONZÁLEZ VARGAS et al., 2020]

L'utilisation de techniques de storytelling et également la *gamification*, qui décrit des techniques inspirées du jeu, permettent d'accroître la participation des utilisateurs [MOTÉJLEK et ALPAY, 2019]. Dans le cadre de la *gamification*, les notions de motivations intrinsèques et extrinsèques peuvent être distinguées. La première fait référence aux récompenses internes, qui ne dépendent pas d'un contrôle externe, alors que les secondes font appel à la notion de récompense et permet un engagement sur le court terme. Avec la motivation extrinsèque, l'utilisateur exprime un désintérêt lorsqu'il n'y a plus de récompense sauf s'il a trouvé une autre raison de continuer. Il existe deux types de *gamifications* : celles basées sur l'attribution de récompenses et les *serious game*. Ces derniers sont intéressants du point de vue de l'expérience utilisateur et de l'engagement, ayant leur intérêt dans la combinaison de la navigation et de l'exploration avec des éléments de jeu [PALIOKAS et al., 2020].

Un prototype de *Serious game* en réalité augmentée a été développé pour le musée de la bière *Tsingtao*. Ce jeu est développé pour les appareils mobiles tels que les smartphones et tablettes des visiteurs et utilise en temps réel la localisation de l'utilisateur et sa progression dans le jeu pour lui proposer du contenu. L'application sous cette forme facilite une exploration plus large du musée et afin d'encourager davantage les visiteurs à l'utiliser, des récompenses sont délivrées dans le jeu sous la forme de coupons à utiliser dans la boutique de souvenirs [LI et al., 2019]. *ARQuiz* est une application en réalité augmentée sous la forme d'un quizz proposé aux visiteurs d'un espace d'exposition. L'analyse de son utilisation a montré qu'il existe une corrélation entre l'appréciation des visiteurs de l'exposition, et le degré d'appréciation du quiz et de l'application [NOREIKIS et al., 2019].

Mapping the Symphony et *National Science and Media Museum Gallery Listening Sessions* sont deux projets de réalité augmentée auditives ayant pour objectif de promouvoir l'exploration et l'engagement des visiteurs dans les institutions culturelles et les expositions [CLIFFE et al., 2019].

Dans le cadre d'un projet visant à promouvoir le patrimoine culturel lié à l'auteur italien *Italo Svevo*, un circuit de réalité augmentée a été mis en place dans la ville de Trieste ainsi qu'au musée littéraire de celle-ci. Un des objectif principal de ce pro-

jet était d'engager les visiteurs grâce à l'utilisation de techniques de *storytelling*, en particulier le public adulte et les personnes âgées, qui représentent la majorité des visiteurs du musée [FENU et PITTARELLO, 2018].

2.3.2 Restauration numérique et collections inaccessibles

Des artefacts peuvent ne pas être exposés au public, que ce soit partiellement ou totalement, pour plusieurs raisons, principalement liées à la détérioration matérielle au cours du temps. Un objet peut subir la perte d'un fragment, un site archéologique n'exister plus que (très) partiellement ou encore un artefact avoir perdu ses couleurs. Des applications de réalité augmentée de reconstruction peuvent alors permettre à l'utilisateur de visualiser des ressources qui existent encore partiellement, ou qui ont existées uniquement dans le passé [BEKELE et al., 2018] et de communiquer des informations à propos d'endroits disparus au cours du temps ou encore qui sont trop fragiles pour être exposées à un public de masse [HARRINGTON et al., 2019]. [STANCO et al., 2017] parle d'*anastylose virtuelle* pour décrire la reconstruction de parties existantes mais démembrées dans un modèle virtuel.

Outre le problème lié à l'état des artefacts, les musées (archéologiques principalement) sont également confrontés au problème d'un manque de place par rapport au grand nombre d'artefacts possédés, rendant impossible l'exposition de tous ces artefacts. La réalité augmentée offre la visualisation virtuelle de ces artefacts, tout en ajoutant de l'information et en améliorant l'expérience des visiteurs [A. ABATE et al., 2018]. Cette substitution, ou remplacement des objets réels par des objets virtuels, peut également être utilisée en cas d'indisponibilité de l'artefact pour restauration, prêt ou en cas de vol par exemple [BAAZIZ, 2018]. Elle peut alors permettre aux visiteurs de manipuler virtuellement ces objets du musée qui ne sont pas exposés.

La réalité augmentée peut s'avérer être utile également dans le cadre de la rétro-ingénierie, consistant à étudier un objet afin d'en comprendre le fonctionnement ou la méthode de fabrication. La restauration virtuelle éphémère présente l'avantage de permettre la modification de la rétro-ingénierie autant que nécessaire, par exemple avec la découverte de nouveaux indices historiques. De plus, différentes versions d'un objet pouvant être réalisées, les visiteurs peuvent alors comparer leurs

expériences face à différents rendus en fonction des hypothèses historiques émises. La réalité augmentée permet également la restauration numérique durable des objets par rétro-ingénierie et la sauvegarde numérique durable du patrimoine mondial [BAAZIZ, 2018]. Elle permet également de contextualiser des objets isolés, comme l'a fait [NOFAL et al., 2018] avec un artefact isolé du palais de Nimrud en Irak conservé aux Musées royaux d'Art et d'Histoire de Bruxelles. L'application est installée sur une tablette appartenant au musée et permet d'afficher à l'écran l'artefact intégré dans la structure globale dans laquelle il se trouvait dans son contexte initial (Figure 15) : le contexte originel de l'artefact est reconstruit virtuellement.

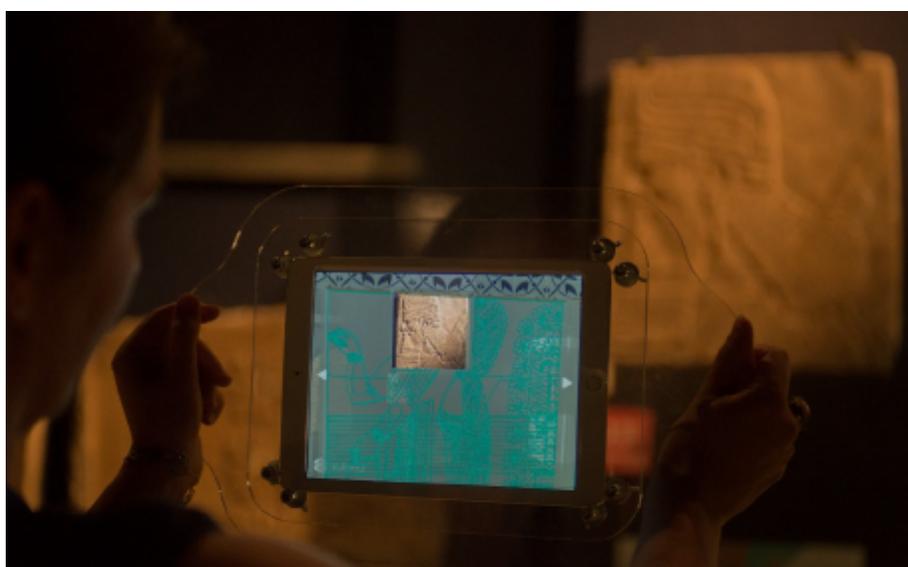


FIGURE 15 – Contextualisation d'un artefact par [NOFAL et al., 2018]

Le système de réalité augmentée proposé par [KYRIAKOU et HERMON, 2019] au sein d'un musée du patrimoine culturel permet au visiteur d'interagir avec des répliques virtuels en trois dimensions d'artefacts du musée. L'outil d'interaction avec ces objets numériques en 3D est la main de l'utilisateur : le système mis en place suit la rotation et la position des paumes et des doigts, utilisant ainsi l'interaction naturelle, comme si l'utilisateur interagissait avec des objets du monde réel. L'objet est affiché sur l'écran d'un smartphone, utilisé avec un *Google cardboard*. Cette approche résout le problème d'inaccessibilité et de non-interaction avec les objets du patrimoine culturel qui ne sont pas disponibles.

Avec l'application de réalité augmentée de type miroir *TinajAR*, [MARTÍNEZ et al., 2018] réinterprète un ancien type de cave qui était utilisé dans le passé pour stocker le vin dans le nord de l'Espagne, en lui donnant une utilisation différente mais significative. Cette application expose des pièces de céramiques virtuelles tout en expliquant le processus de poterie par le biais d'avatars virtuels. Afin de créer une application plus attrayante et centrée sur les utilisateurs, ceux-ci peuvent voir une image réfléchi d'eux-mêmes, augmentée des poteries virtuelles. Par cette utilisation de l'effet miroir, les visiteurs sont plus conscients de leurs actions ce qui fait d'eux le véritable centre de l'application.

Sur les sites archéologiques, la réalité augmentée peut être utilisée pour reproduire fidèlement l'expérience perceptive d'un environnement, là où images, textes et artefacts ne montrent qu'une partie des sites, et ce en préservant l'intégrité des sites [HARRINGTON et al., 2019]. De plus, elle permet de visiter un lieu 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], permettant aux visiteurs de comparer un même endroit à deux époques différentes. La réalité augmentée utilisée pour la reconstruction de sites archéologiques peut également être développée sous l'eau. Le système de réalité augmentée élaboré par [ČEJKA et al., 2020] est destiné aux sites archéologiques subaquatiques. Il superpose des objets virtuels de reconstruction à l'image réelle des fonds marins (ici à Baiae en Italie, voir Figure 16) à travers un smartphone scellé dans une protection étanche.



FIGURE 16 – Reconstruction numérique sur un site archéologique subaquatique par [ČEJKA et al., 2020]

Le rôle de la réalité augmentée dans la redécouverte des sites du patrimoine culturel en ruines et de son histoire est mis en avant par [ALI et HAMED, 2019] avec le système imaginé à Qasr al-Abd (ou au Palais des esclaves) situé sur le site de l'Iraq al-Amir en Jordanie. Via un dispositif portable, le visiteur parcourt le site tout en apprenant et comprenant davantage ce qui le constitue et son histoire, via des reconstructions virtuelles de bâtiments, d'artefacts ainsi que d'animations reproduisant des activités du quotidien et des événements historiques, le tout sous la forme narrative. Les éléments sont affichés sur l'écran en fonction de la position de l'utilisateur ce qui permet d'obtenir des informations détaillées sur tout objet ou monument se trouvant, ou s'étant trouvé dans le passé, sur le site et d'interagir avec eux. Un projet similaire a été développé au Pakistan afin de préserver et restaurer des sites et structures historiques ainsi que des biens culturels [JAMIL, 2019].

En Espagne, dans l'église Sant Climent de Taüll une restauration des peintures murales est projetée sur les restes réels de peintures romanes (Figure 17) grâce à six projecteurs. Il s'agit du projet #Taull1123, ces peintures datant de l'année 1123.

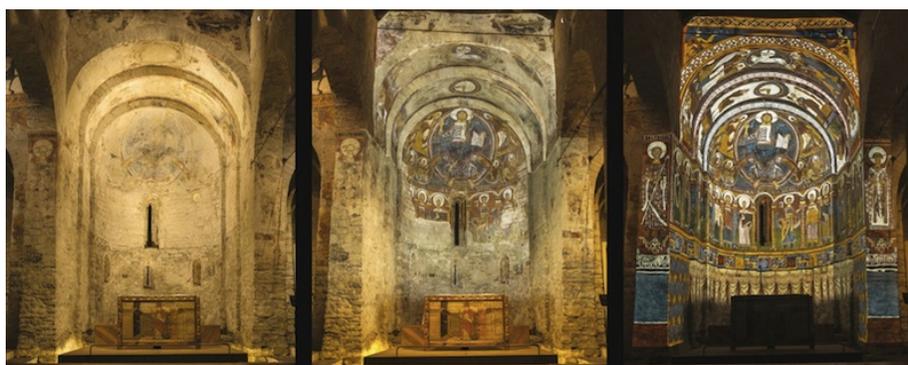


FIGURE 17 – Restauration numérique par projection de couleurs dans l'église Sant Climent de Taüll par [SIERRA et al., 2015]

Avec l'application mobile *The New Philadelphia AR Tour*, [AMAKAWA et WESTIN, 2018] cherche à donner un sens à un paysage désormais dénudé tout en défendant le fait que ce n'est pas parce qu'il ne subsiste plus aucun bâtiment qu'un site historique perd de son importance ou devient moins digne d'interprétation. Sur base des sources disponibles, à savoir des preuves archéologiques, des dessins réalisés par d'anciens habitants et des représentations d'autres bâtiments du 19e siècle, tout un

contexte a été recréé virtuellement. Les visiteurs peuvent alors, grâce à l'application, se promener sur le site de New Philadelphia, voir des bâtiments historiques placés à leur emplacement d'origine et découvrir l'histoire des afro-américains esclaves au 19e siècle.



FIGURE 18 – Reconstruction de ce qui était autrefois *North street* par [AMAKAWA et WESTIN, 2018]

Un dernier exemple de reconstruction visuelle est celui de [BLANCO-PONS, CARRIÓN-RUIZ, DUONG et al., 2019] avec le développement d'une application de réalité augmentée pour les monuments historiques situés sur la *Colline du Parlement* à Ottawa. En prévision d'un projet de rénovations, lequel rendra ces bâtiments inaccessibles au public, l'application se veut être un outil enrichissant les visites de ce site durant les travaux de restauration. Le contenu proposé est notamment une simulation de la fusion de photos historiques et actuelles (Figure 19). Cette application est basée sur la vision et recon-



FIGURE 19 – Photographie fusionnant passé et présent par [BLANCO-PONS, CARRIÓN-RUIZ, DUONG et al., 2019]

naît les façades des différents monuments tout en tenant compte des différents facteurs pouvant compliquer cette reconnaissance, tels que l’occultation d’une partie ou les grandes variations de luminosité.

Les reconstructions auditives existent également. Les visiteurs du site archéologique médiéval de Crkvina en Croatie peuvent, grâce à une application installée sur leurs smartphones et des écouteurs, découvrir le paysage sonore du IXe siècle [SIKORA et al., 2018]. Cette promenade sonore a été développée avec la collaboration des archéologues ayant réalisé des fouilles sur le site et essaye d’imiter les sons des églises et monastères qui le constituent, tout en intégrant différents sons d’arrière-plan, de la géophonie (vent et eau) et de la biophonie (arbres, oiseaux, abeilles et animaux domestiques). Le son est auralisé et les capteurs de localisation et d’orientation du smartphone sont utilisés afin que les sons que le visiteur entend correspondent à sa localisation sur le site. Des commentaires audios délivrant des informations sur le site font également partie de l’application.

2.3.3 Guide, contenu personnalisé et apprentissage

Grâce à l’évolution rapide de la technologie de réalité augmentée mobile, de nombreux musées l’ont incorporée et utilisée en tant que guide pour leurs expositions [POLLALIS et al., 2018]. Elle permet également d’améliorer l’expérience d’apprentissage des visiteurs, notamment grâce aux approches thématiques et personnalisées pour visiter les lieux d’expositions. De plus, il a été montré que la réalité augmentée portable favorise le processus d’apprentissage global en présentant des informations instantanément disponibles et plus faciles à retenir. Il faut cependant noter que dans certains cas, l’utilisateur peut mettre davantage l’accent sur l’appareil lui-même, retenant les informations données par le dispositif plutôt que sur leur environnement immédiat et ainsi omettre des détails de l’œuvre en elle-même [DIECK et al., 2018].

Au *Musée d’histoire naturelle* de l’Université du Colorado, le système *Mata-morphosis* a été proposé aux visiteurs de l’exposition *Becoming butterflies*, destinée à éduquer les enfants aux cycles de vie de plusieurs espèces de papillons [KELLY et al.,

2017]. Le corps et les mouvements des visiteurs sont détectés par un *Kinect*, qui leur permet d'interagir avec un personnage animé projeté sur un écran, d'abord en se tortillant pour sortir de l'œuf et devenir une chenille, puis en se déplaçant pour manger des feuilles, en tendant les bras pour s'accrocher à une branche et devenir une chrysalide... pour finir par faire des mouvements de bras pour permettre au papillon de s'envoler. Il a été montré que l'intégration de fonctions telles que l'utilisation du corps du visiteur comme *input* favorise l'apprentissage en engageant le visiteur dans une exploration active [KORTBEK et GRØNBÆK, 2008].

MRsive est un outil portable de réalité augmentée ayant une approche centrée sur l'utilisateur, testée à la Galerie d'Art d'Ontario (AGO) et permettant notamment de faciliter la navigation dans le musée [AL RABBAA et al., 2019]. Le guidage se fait grâce à différentes interfaces de navigation (Figure 20) : le visiteur choisit tout d'abord des points d'intérêts sur une carte, la caméra de son smartphone s'allume ensuite afin de scanner son environnement pour permettre la localisation au sein du bâtiment en comparant les images de la vue directe à celles du modèle 3D enregistré dans la base de données. Des flèches apparaissent alors à l'écran au niveau du sol, menant l'utilisateur à la destination sélectionnée précédemment. Lorsqu'il est bien arrivé à l'œuvre désirée, celle-ci peut être scannée afin de voir s'afficher des informations complémentaires sous la forme visuelle ou sonore.

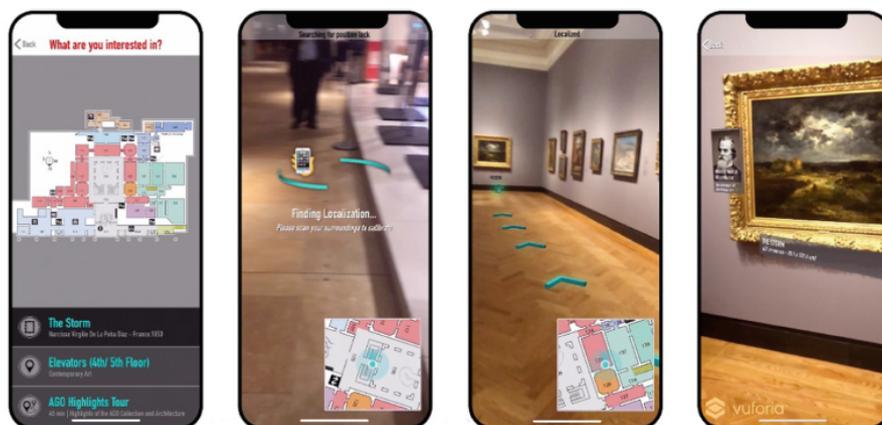


FIGURE 20 – Les différentes étapes de navigation avec *MRsive* par [AL RABBAA et al., 2019]

The Loupe est une loupe en bois dans laquelle est placé un *iphone*. Il s'agit d'un prototype qui a été mis en place dans trois musées : le *Musée Allard Pierson* à Amsterdam, *Museon* à La Haye et le *Musée national d'histoire* à Sofia. Le visiteur utilise cette loupe pour examiner les artefacts du musée, qui sont reconnus grâce à la caméra du téléphone et un algorithme de reconnaissance d'images. Lorsqu'un artefact est reconnu, un contenu (textes, images, animations) lié à celui-ci est alors affiché sur la loupe (Figure 21). En plus de faciliter l'exploration du musée en fournissant des informations sur un artefact sur demande, la loupe peut être utilisée pour proposer aux visiteurs une visite thématique en l'orientant sur certains artefacts plutôt que d'autres [VAN DER VAART et DAMALA, 2015].



FIGURE 21 – La *Loupe* par [VAN DER VAART et DAMALA, 2015]

Au *Musée des arts et Métiers* à Paris, un système de réalité augmentée auditif a été développé : *SARIM*, sous la forme d'un casque stéréo Bluetooth auquel est fixé un capteur d'orientation. En plus de créer une ambiance sonore (voir *Immersion* ci-dessous), des commentaires audio donnent une description vocale de l'artefact augmenté (narration, témoignage ou dialogue avec l'artefact ou son inventeur). Avant de commencer la visite, le visiteur renseigne son âge, sa langue, ce qui l'intéresse dans le musée et s'il s'agit de sa première visite. Sur base de ces informations, un itinéraire personnalisé sera alors proposé, lequel sera adapté dynamiquement durant la visite d'après le comportement de l'utilisateur avec les artefacts exposés [F. Z. KAGHAT et

al., 2020].

ARtLens est une application de réalité augmentée développée pour être utilisée avec *Microsoft HoloLens* au sein du *Davis Museum* dans le Massachusetts pour la collection d'art africain [POLLALIS et al., 2018]. Elle permet aux visiteurs du musée d'interagir activement avec les artefacts ainsi que d'apprendre des informations les concernant tout en restant concentré sur l'objet de l'exposition. En plus de fournir des informations (visuelles et auditives), l'application guide également l'utilisateur.

Enfin, l'application pour le musée de la bière *Tsingtao*, présentée précédemment, demande aux visiteurs, avant de commencer le jeu, de choisir les tags qui l'intéressent afin de déterminer un des cinq itinéraires du jeu possibles [LI et al., 2019].

2.3.4 Immersion et présence

Slater [SLATER et WILBUR, 1997] distingue les concepts d'*immersion* et de *présence*. L'immersion est relative au dispositif utilisé et la mesure dans laquelle celui-ci fournit une illusion de réalité étant :

- *inclusive*, c'est à dire excluant le monde réel;
- *étendue*, ce qui correspond aux modalités sensorielles prises en compte;
- *environnante*, c'est à dire panoramique, est non limitée à un champ étroit;
- *vivante*, correspondant à la résolution, la fidélité et la richesse de l'énergie simulée dans une modalité particulière.

L'immersion est donc directement liée à la technologie du système et peut donc être décrite de manière objective et quantifiable, contrairement à la présence. Cette dernière reflète plutôt un état de conscience dont la description est à la fois subjective et objective. Subjective par l'évaluation faite par l'utilisateur du système de son degré de *présence*, de la mesure dans laquelle les éléments virtuels lui apparaissent comme étant réellement présents. Objective par la similarité de comportement de ce même utilisateur entre un monde virtuel et la réalité quotidienne. Le degré de présence dépend en partie de l'immersion : plus elle est importante, plus la présence le sera également. Deux paramètres influencent cependant cette relation : le contexte d'application et les exigences perceptuelles de l'individu. Il est à noter que si cette approche

est orientée environnements complètement virtuels (réalité virtuelle), elle peut être adaptée à la réalité augmentée, la présence pouvant alors être définie comme étant *l'impression que des objets virtuels sont présents dans l'environnement réel, plutôt que de transporter ou d'immerger l'utilisateur dans un autre environnement* [WITMER et SINGER, 1998].

Bystrom [BYSTROM et al., 1999] se base sur ces approches d'*immersion* et de *présence* pour construire son modèle d'interaction dans un environnement virtuel : *IPP (Immersion, Presence, Performance)*. Celui-ci se divise en plusieurs couches représentant les facteurs influençant le sentiment de présence dans un environnement virtuel. La première est le type de *dispositif* utilisé par l'utilisateur, dont les attributs quantifiables (tels que la résolution, le degré de liberté, etc.) constituent la deuxième couche, correspondant à l'*immersion* telle que définie précédemment. Ces caractéristiques physiques influencent la *fidélité sensorielle*, définie comme étant la mesure dans laquelle les modifications virtuelles apportées par le dispositif sont similaires à celles des informations sensorielles dans le monde réel, influençant à son tour l'*interaction* que l'utilisateur a avec l'environnement virtuel, le tout ayant une influence sur le sentiment de *présence*. La présence est également directement influencée par les tâches réalisées par l'utilisateur.

Il existe de nombreuses approches tentant d'appréhender ces deux concepts de *présence* et d'*immersion*, représentées par différents termes mais représentant globalement les mêmes idées. Zhang [ZHANG et al., 2017] les a regroupées de la manière suivante :

- *Embodied immersion*, ou immersion non-diégétique, localisée, physique, sensorielle(-moteur), perceptuelle, spatiale, égocentrique, viscérale : permet à l'utilisateur de ressentir la *présence corporelle* dans l'environnement virtuel, est basée sur des stimuli sensorimoteurs et le contrôle de l'environnement virtuel, correspondant donc à l'*immersion* décrite ci-dessus ;
- *Empathetic immersion*, ou immersion diététique, mentale, imaginative, fictive, cognitive et émotionnelle, psychologique, narrative, exocentrique, par procuration, présence de soi : permet à l'utilisateur de se former une représentation mentale par le biais de l'imagination ou d'autres moyens psychologiques, cognitifs ou émotionnels, correspondant donc à la *présence* décrite ci-dessus.

La présence est donc essentiellement un paramètre cognitif alors que l'immersion fait essentiellement référence aux paramètres physiques de l'information sensorielle et est fonction de la technologie utilisée [KALAWSKY, 2000].

Dans la réalité augmentée, différents facteurs favorisent l'immersion et la présence de l'utilisateur. L'immersion avec la réalité augmentée peut être renforcée avec un visuel réaliste : une corrélation a effectivement été mise en évidence entre la perception de réalisme et le sentiment d'immersion et de présence dans la réalité augmentée. La représentation en trois dimensions renforce également le sentiment d'immersion et permet de vivre des expériences intenses en donnant vie à des situations historiques par exemple [ROEDERER et al., 2020]. De plus, l'immersion est plus importante en optimisant la connexion au monde réel, c'est à dire en créant une combinaison significative du réel et du virtuel, en apportant une signification supplémentaire au monde réel. Le contenu additionnel d'ambiance, avec des sons par exemple, contribue également à renforcer l'immersion de l'utilisateur [HARRINGTON et al., 2019].

Les dispositifs et les caractéristiques favorisant l'immersion sont discutés au point 3.2.

Au *Telegraph Museum* à Porthcurno, une expérience d'*escape room* collaborative utilisant *Microsoft HoloLens* a été mise en place. Celle-ci a pour but de simuler un exercice d'entraînement à la télégraphie de la seconde guerre mondiale. L'avantage de l'*HMD* est que le contenu diffusé s'aligne directement sur le regard de l'utilisateur et couvre la plus grande partie de son champ de vision, rendant l'expérience plus convaincante et plus immersive que celle offerte par un smartphone ou une tablette. Le respect des lois de la perspective ainsi que la diffusion de sons renforcent encore ce sentiment d'immersion [KRZYWINSKA et al., 2020].

AR Perpetual Garden App est un prototype de système de réalité augmentée sous forme d'une application pour appareils mobiles au *Carnegie Museum of Natural History*. Celui-ci propose des environnements virtuels immersifs utilisant à la fois la représentation visuelle (des dioramas), des commentaires auditifs (apportant des précisions concernant ce qui est affiché à l'écran) et des sons d'ambiance [HARRINGTON et al., 2019].

Le système de réalité augmentée audio *SARIM* déjà présenté précédemment (voir 2.3.3) a délimité deux zones sonores différentes pour chaque artefact augmenté (Figure 22). Dans la première, en bleu, le son émis est un son d'ambiance, celui produit par cet objet ou par son environnement par exemple. Dans la seconde, en rouge, plus proche de l'artefact, il s'agit d'un commentaire auditif fournissant des informations liées à cet artefact. Le matériel utilisé a son importance puisqu'il s'agit d'un casque stéréo auquel est fixé un capteur permettant d'en obtenir la position en temps réel et diffusant un son binaural, le tout favorisant l'immersion de l'utilisateur [F. Z. KAGHAT et al., 2020].

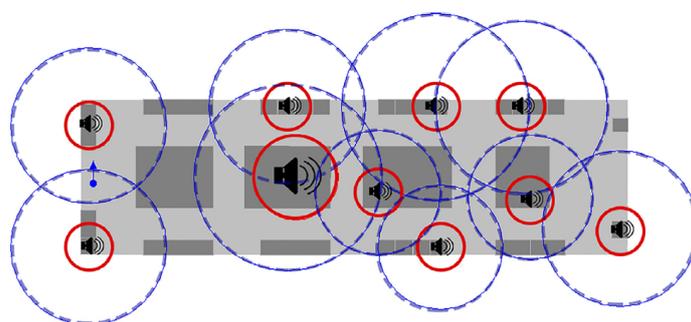


FIGURE 22 – Zones sonores autour des artefacts par [F. Z. KAGHAT et al., 2020]

Enfin, un système se voulant particulièrement immersif a été mis en place au *Musée municipal* de Faro, Portugal [RODRIGUES et al., 2019]. *M5SAR*, pour *Mobile Five Senses Augmented Reality*, est un système mobile de réalité augmentée s'étendant aux cinq sens, basé sur la combinaison d'un smartphone (ou d'une tablette) sur lequel est installé une application classique pour la vue et le son, et d'un appareil portable y ajoutant le toucher, le goût et l'odorat (Figure 23). Selon l'œuvre et son histoire, le musée a préparé une narration sur cinq sens, définissant ce qui devait être utilisé, comment le répartir dans le temps, sur quelle durée et avec quelle intensité. Chaque sens peut être stimulé individuellement ou de manière combinée avec les autres. L'apport du toucher, du goût et de l'odorat crée une expérience *étendue*, mais l'utilisation d'un smartphone pour les deux autres sens limite son aspect *environnant*.



FIGURE 23 – Système M5SAR par [RODRIGUES et al., 2019]

2.3.5 Expériences sociales

La réalité augmentée améliore les interactions avec le monde physique et les objets qui le composent mais elle peut également améliorer les interactions entre visiteurs et susciter un discours productif chez ces derniers. Les conversations concernant les objets exposés pendant et après la visite d'un musée s'intègrent dans un système de construction de sens [MATUK, 2016].

Ces interactions peuvent prendre différentes formes, allant de susciter un simple échange à la collaboration. La possibilité de créer des expériences de réalité augmentée collaboratives et multi-utilisateurs est cependant assez récente [KRZYWINSKA et al., 2020].

D'après [FRANZ, REILLY et al., 2019], la capacité de visiter un musée accompagné tout en étant capable de communiquer et de partager des idées et des sentiments individuels est une part importante de l'expérience d'un musée, et le fait de pouvoir partager son expérience et d'échanger des opinions ainsi que des commentaires entre les points d'intérêts est une source de plaisir pour les visiteurs [RECUPERO et al., 2019]. La réalité augmentée collaborative peut soit améliorer les interactions en face à face, soit créer un sentiment de co-présence parmi les collaborateurs à distance [LUKOSCH et al., 2015].

Il est essentiel de favoriser la collaboration et les conversations entre les divers groupes de visiteurs pour créer des expériences d'apprentissage intéressantes dans les musées. *Discovery Palace*, un musée des sciences en Caroline du Nord, a développé un prototype appelé *IDEA*, pour *Interactive Data and Embodied Analysis*, permettant aux visiteurs du musée d'utiliser leurs corps pour explorer de grands jeux de données via un dispositif de projection. Ce système a été pensé de manière à encourager la collaboration entre deux utilisateurs à un moment donné : un utilisateur contrôle l'aspect *start/stop* du système alors qu'un autre en contrôle la navigation, le tout devant être réalisé de manière collaborative [MISHRA et CAFARO, 2018]. L'avantage de la réalité augmentée spatiale, contrairement aux systèmes portatifs personnels, est qu'elle permet à plusieurs utilisateurs de faire l'expérience synchronisée de la même réalité augmentée [MATUK, 2016]. L'application pour le musée de la bière *Tsingtao* présenté précédemment permet aux visiteurs de collaborer en ayant des interactions dans le monde réel en cas de difficultés rencontrées dans le jeu [LI et al., 2019]

L'utilisation de la réalité augmentée peut également permettre aux visiteurs de laisser leur créativité s'exprimer. Avec le projet *I was here*, les visiteurs peuvent créer des graffitis numériques à l'aide de la réalité augmentée mobile (Figure 24). Les créations sont personnelles et uniquement affichées à l'écran de l'utilisateur mais peuvent être partagées, via les réseaux sociaux par exemple [ŠIMER et al., 2016].



FIGURE 24 – Graffiti sur le mur d'une forteresse, tel qu'apparaissant à l'écran - [ŠIMER et al., 2016]

2.3.6 Inclusion

La réalité augmentée peut s'avérer être utile pour favoriser l'accès aux lieux culturels et leurs œuvres aux personnes souffrant d'un handicap, qu'il soit sensoriel, moteur ou encore les troubles neurodéveloppementaux. Seule la question de l'accessibilité pour les personnes souffrant d'un handicap sensoriel, visuel plus particulièrement, sera abordée dans le cadre de ce travail.

La réalité augmentée peut fournir aux utilisateurs souffrant de handicaps sensoriels l'opportunité d'interagir avec des éléments, là où ce ne serait pas possible avec des dispositifs plus classiques [GONZÁLEZ VARGAS et al., 2020]. Les personnes aveugles et malvoyantes sont confrontées à de nombreuses contraintes lorsqu'elles visitent les expositions des musées, étant donné la position centrale donnée à l'utilisation de la vue et le manque d'accès cognitif, physique et sensoriel aux expositions ou aux artefacts. Ces difficultés sont accrues par l'inaccessibilité à l'utilisation de technologies numériques [VAZ et al., 2018].

L'accès et la compréhension des œuvres pour les personnes malvoyantes passe essentiellement par le toucher, permettant la construction d'une image mentale des artefacts. Il n'est cependant pas toujours permis de toucher les objets exposés et la limite est évidente quand il s'agit par exemple d'œuvres en deux dimensions. Si les descriptions auditives peuvent être une porte d'accès aux expositions, elles peuvent faire référence à des concepts non connus de personnes nées malvoyantes, entravant la construction d'une image mentale de l'œuvre. Vaz [VAZ et al., 2020] a mis en avant cinq types de dispositifs favorisant l'accessibilité aux œuvres exposées dans les musées/galeries :

- *dispositifs haptiques pour l'exploration des copies virtuelles* : permettant une perception kinesthésique, avec retour de force, et ainsi d'acquérir des informations perceptuelles telles que la forme, le poids, la texture et les propriétés des matériaux, tout en manipulant des objets virtuels tridimensionnels ou d'autres environnements générés par ordinateur ;
- *réplicas interactifs tactilement* : des réplicas d'œuvres sont augmentés auditivement, améliorant l'accessibilité intellectuelle et sensorielle ;

- *reliefs tactiles avec lesquels l'interaction est basée sur des gestes* : non invasif, peut être utilisé directement avec les artefacts originaux si c'est autorisé et s'avère être particulièrement utile pour les images en 2D (peintures, photos, etc.);
- *navigation assistée* : aide à la navigation au sein de l'établissement, qui permet alors d'être réalisée sans aide extérieure;
- *solution hybride* : favorise à la fois l'accès aux collections et la navigation.

Tooteko est un système de réalité augmentée de type *réplicas interactifs tactilement* et destiné à une utilisation avec des œuvres en trois dimensions exclusivement (telles que les sculptures, les objets, l'architecture, et non les dessins, peintures, gravures, etc.). Il permet de toucher un réplica de l'œuvre en modèle réduit, réalisé à l'aide d'une imprimante 3D, de sentir les matériaux et de distinguer les détails du bout des doigts tout en écoutant des informations audios contextuelles avec des écouteurs. Cela est possible grâce à l'utilisation d'une bague spéciale pouvant lire des capteurs se trouvant sur l'œuvre réduite (Figure 25). L'information auditive est donc pertinente pour la partie de l'objet qui est touchée à un moment précis. Ce système permet de profiter de l'œuvre d'art dans son contexte, et non dans un musée de répliques pour malvoyants. Il peut donc être particulièrement efficace pour l'accès aux objets du patrimoine culturel à des personnes qui souffrent de déficiences visuelles, permettant ainsi une réduction sensible des barrières. De plus, cette réalité augmentée peut s'avérer également utile pour d'autres catégories de visiteurs qui favorisent la dimension tactile, comme les enfants, avec l'adaptation du contenu à leurs besoins [D'AGNANO et al., 2020]. Outre le fait d'offrir la possibilité d'interagir avec des représentations tactiles des objets exposés, la réalité augmentée peut également rapprocher les visiteurs ne souffrant pas de handicaps des collections des musées, en augmentant leurs expériences sensorielles [BERNARDO, 2016]. Il est important que les solutions déployées pour permettre l'accessibilité des collections soient bénéfiques à tous types de visiteurs [VAZ et al., 2020].

Un prototype d'audioguide interactif contrôlé par les gestes a été mis en application avec la peinture *Le Baiser* de Klimt [REICHINGER et al., 2016]. L'objectif est de permettre aux personnes souffrant d'un handicap visuel de pouvoir découvrir

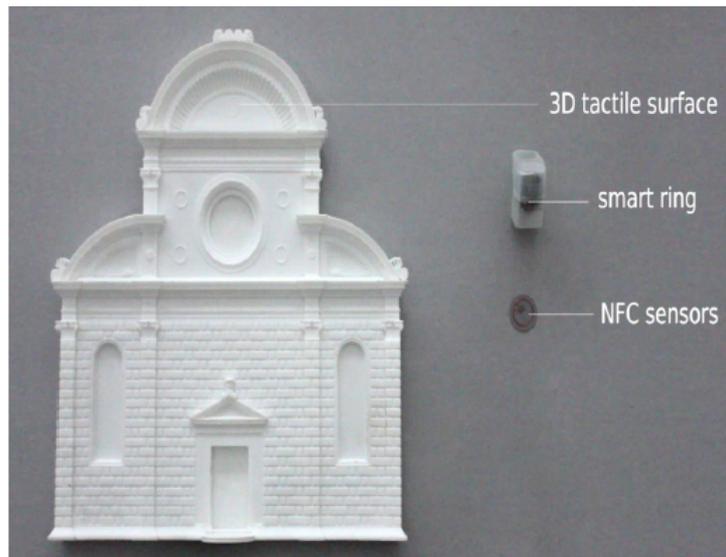


FIGURE 25 – [D’AGNANO et al., 2020] *Tooteko* - parties du système

l’œuvre par elles-mêmes, sans avoir besoin de quelqu’un pour les guider. La peinture a dans un premier temps été transposée en un relief en *2.5 dimensions* (Figure 26) puis des régions ont été identifiées comme ayant un intérêt pour la description de celle-ci. Des textes audios ont été enregistrés, liés aux régions identifiées ou dont le contenu est plus général par rapport à l’œuvre. Une caméra (*depth camera*, attribuant à chaque pixel une valeur de profondeur permettant de connaître la distance qui les sépare) est alors placée au-dessus, permettant la reconnaissance des mains et des gestes de l’utilisateur afin de délivrer le contenu audio au moment opportun. L’évaluation de ce prototype par des personnes malvoyantes a révélé l’utilité du système, particulièrement pour les personnes totalement aveugles qui ont apprécié l’autonomie dans leur exploration de l’œuvre. Elle a également permis de mettre en avant le bénéfice apporté pour la création d’une image mentale et la compréhension de la peinture. Ce dispositif a été développé avec un relief en *2.5D* mais pourra être généralisé pour des artefacts en deux ou trois dimensions.



FIGURE 26 – présentation du système développé par [REICHINGER et al., 2016]

Le buste et la tête d'une statue grecque archaïque ont été séparés, chaque partie étant maintenant conservée dans un musée distinct (le *Musée Civique du Château d'Ursino* (Catane) et le *Musée Archéologique* de Syracuse, tous deux en Sicile) [STANCO et al., 2017]. Étant donné qu'un réassemblage n'est pas envisageable, une anastylose virtuelle a été réalisée. Dans un premier temps, cette reconstitution a été mise à disposition du grand public via une plateforme web, mais cette solution excluait complètement l'accès aux personnes ayant une déficience visuelle. Un système a alors été développé, permettant l'exploration de l'œuvre grâce à un dispositif haptique appliquant des retours de force sur la main de l'utilisateur. S'il permet à un public bien spécifique d'avoir accès à l'œuvre là où ce n'était préalablement pas possible, ce dispositif d'interaction tactile permet également un accès différent à l'œuvre pour le grand public. Une impression en trois dimensions du modèle reconstitué a également été réalisée.

3 Taxonomie

Le point 2.2.1 nous a montré que peu de taxonomies sont spécifiques au patrimoine culturel et que celles-ci ne représentent pas les six grands apports de la réalité augmentée pour les musées, galeries, monuments et sites historiques identifiés au point 2.3. Nous proposons donc de développer une nouvelle taxonomie, reflétant ces apports pour les visiteurs de ces lieux.

3.1 Méthodologie

La méthode utilisée pour la création de cette taxonomie s'est largement inspirée de celle développée par [NICKERSON et al., 2013], dont les différentes étapes sont illustrées en Figure 27.

La première étape consiste donc à déterminer une méta-caractéristique, c'est à dire une caractéristique qui nous servira de fil conducteur pour déterminer les différentes dimensions et caractéristiques qui constitueront la taxonomie. Le choix de cette méta-caractéristique dans le cadre de ce travail est l'apport de la réalité augmentée pour un utilisateur dans le cadre de la visite d'un lieu proposant du contenu lié au patrimoine culturel (à savoir : musées, galeries, sites et monuments historiques).

La seconde étape consiste en la détermination de conditions de terminaison : la méthode proposée étant itérative, il est nécessaire de préciser les conditions que doit satisfaire la taxonomie pour pouvoir dire que le processus est terminé.

Deux conditions objectives de terminaison ont été retenues :

- chaque dimension doit être unique et non répétée ;
- chaque caractéristique doit être unique au sein d'une dimension.

De cette manière, nous nous assurons le respect de notre définition de taxonomie, telle qu'explicitée au point 2.2.1.

Les cinq conditions subjectives de terminaisons proposées par [NICKERSON et al., 2013] ont également été retenues, c'est à dire que la taxonomie doit être :

- *concise* : le nombre de dimensions de la taxonomie doit permettre à cette taxonomie d'être significative sans être trop complexe ;
- *robuste* : les dimensions et les caractéristiques qui les composent doivent permettre une différenciation suffisante des objets pour qu'ils présentent un intérêt ;
- *complète* : il doit être possible de classer tous les objets d'un échantillon aléatoire ;
- *extensible* : de nouvelles dimensions ou caractéristiques doivent pouvoir être ajoutées facilement quand de nouveaux types d'objets apparaissent ;
- *explicative* : les dimensions et caractéristiques ne doivent pas décrire en détails les objets, mais plutôt fournir une explication utile sur la nature de ces objets.

La suite de la méthode est itérative, et les deux approches définies ont été utilisées :

- *du conceptuel à l'empirique* : sur base de l'état de l'art établi précédemment ;
- *de l'empirique au conceptuel* : sur base des différents systèmes évalués dans le cadre de ce travail (voir 3.3).

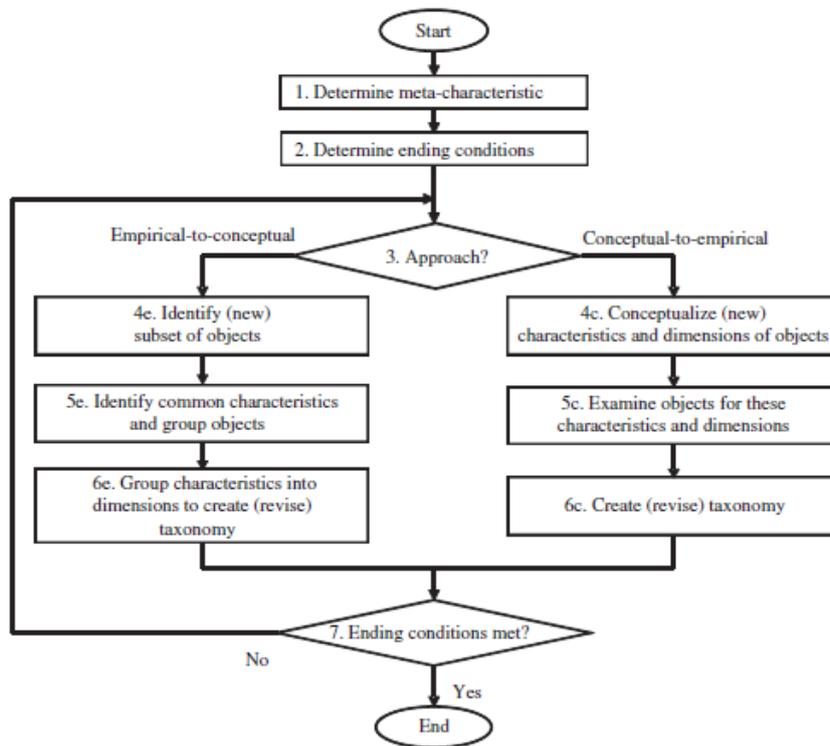


FIGURE 27 – Méthode de développement d’une taxonomie par [NICKERSON et al., 2013]

3.2 Dimensions et caractéristiques

3.2.1 Analyse

La taxonomie présentée par [PUCHAR et KLJUN, 2018] est intéressante à plusieurs niveaux : elle a été développée pour les systèmes de réalité augmentée appliqués au domaine artistique et au patrimoine culturel, et elle est axée sur la perspective de l'utilisateur. Cependant, les différents aspects relevés au point 2.3 ne sont pas bien représentés, principalement l'inclusion qui n'est pas du tout prise en compte et l'activité analytique qui est très générale et pourrait être affinée. De plus, l'attribution du score aux différentes activités n'a pas de base objective, elle est réalisée selon l'évaluation subjective des auteurs, et ne respecte pas notre définition d'une taxonomie qui dit que *chaque objet a exactement une des caractéristique dans chaque dimension*

puisque si une activité n'est pas représentée par un système aucun score ne lui est attribué, et il n'a donc pas une caractéristique dans chaque dimension. Enfin, elle n'est appliquée qu'à des dispositifs visuels alors que nous avons vu au point 2.3 qu'il existait des dispositifs augmentant d'autres sens, qu'il est nécessaire de prendre en compte. C'est pourquoi cette taxonomie sera utilisée comme point de départ pour l'élaboration d'une nouvelle taxonomie des apports de la réalité augmentée dans le cadre du patrimoine culturel, orientée sur l'apport aux utilisateurs, et sera modifiée et affinée sur base de l'état de l'art établi précédemment ainsi que de l'évaluation des différents systèmes.

La première dimension de la taxonomie de [PUCIHAR et KLJUN, 2018] est l'*activité analytique*. Celle-ci est utilisée pour la *description précise d'une œuvre, la situation de cette dernière dans son contexte de création dans le patrimoine culturel ou dans l'espace historique, et l'émergence de questions*. L'apport d'informations complémentaires concernant un artefact, un lieu, ou tout autre objet d'une exposition ou visite, est présent dans une énorme majorité des systèmes rencontrés et semble donc assez peu pertinent en tant que tel, il est nécessaire de l'affiner. C'est pourquoi nous nous focaliseront uniquement sur l'aspect de reconstruction virtuelle, que ce soit d'un objet, d'un lieu ou d'un contexte. Cette reconstruction peut évidemment être visuelle mais peut également concerner les autres sens. Une reconstruction auditive pourrait par exemple être celle d'un bruit produit par l'utilisation d'un artefact. Il peut aussi s'agir d'une construction virtuelle donnant une autre dimension à l'objet exposé ou une construction imaginaire. Nous utiliserons le terme *(re)construction* pour englober ces constructions virtuelles.

La seconde est l'activité sensible, représentant l'immersion, l'imprégnation et l'imagination. Comme nous l'avons vu au point 2.3.4, un système de réalité augmentée peut être plus ou moins immersif d'après ses caractéristiques techniques, et si la présence est difficile à évaluer, il est possible pour l'immersion d'être *quantifiée*. Pour rappel, la taxonomie proposée par [PUCIHAR et KLJUN, 2018] n'a aucun critère précis quant à l'attribution des différents *scores* et il est alors nécessaire de s'interroger sur ce qui rend un système de réalité augmentée plus immersif qu'un autre afin d'affiner

cette approche. La *présence* telle que définie au point 2.3.4, étant dépendante de nombreux facteurs difficilement objectifiables et quantifiables, ne sera pas évaluée dans le cadre de ce travail.

Marto [MARTO et al., 2020], a montré une immersion plus importante avec les dispositifs multimodaux, en combinant les modalités visuelles, auditives et olfactives en sortie. Les systèmes multimodaux sont des *systèmes informatiques dotés de capacités multimodales pour l'interaction homme/machine et capables d'interpréter les informations provenant de divers canaux sensoriels et de communication* [DUMAS et al., 2017]. Au minimum deux modes d'entrée combinés de manière coordonnée sont donc traités par les systèmes d'entrée multimodaux [LIAROKAPIS et al., 2017]. Selon le domaine dans lequel il est utilisé, le terme de *modalité* peut avoir une signification différente [TURK, 2014]. En terme d'interaction homme/machine, la modalité est *la forme sous laquelle les informations sont affichées ou transférées* (parole, texte, visuel, gestuelle, etc.) [BAIG et KAVAKLI, 2020]. Il a été mis en évidence que les utilisateurs préfèrent les *inputs* multimodaux à ceux unimodaux pour l'interaction, pour l'amélioration de la manipulation et la fiabilité du système [OVIATT, 1997] et qu'associées à la réalité augmentée, les représentations multimodales ont un effet positif sur l'engagement de l'utilisateur [W. LIN et al., 2019]. Les systèmes multimodaux (en entrée et en sortie) seront donc considérés comme étant immersifs.

Si le système n'est pas multimodal, les dispositifs et leurs caractéristiques dépendent la modalité concernée.

Les dispositifs visuels de réalité augmentée sont nombreux. Les *handheld* (smartphones, tablettes) ont l'avantage d'intégrer divers capteurs (accéléromètre, gyromètre, magnétomètre...) avec la possibilité de localisation et de tracking. Le tracking, nécessaire pour superposer le contenu virtuel à l'environnement réel [BEKELE et al., 2018], peut être basé soit (1) sur le GPS ou des capteurs intégrés (accéléromètres, gyromètres, NFC, Bluetooth, ...) soit (2) sur la reconnaissance d'image (que ce soit des QR codes ou de la reconnaissance d'images en 2D ou 3D) [GONZÁLEZ VARGAS et al., 2020]. Si le premier favorise l'immersion [R. G. BOBOC et al., 2019; OLANIYAN et al., 2020], c'est le contraire pour le second [FLAVIÁN et al., 2019]. Cependant, la petite surface d'interaction ne permet pas une immersion totale de l'utilisateur dans l'environnement de réalité augmentée [DAMALA et al., 2013]. Les systèmes basés sur la

reconnaissance d'images seront donc considérés comme peu immersifs et les autres comme semi-immersifs [BEKELE et al., 2018].

Tous les autres dispositifs visuels seront considérés comme étant immersifs. Cela inclut les HMD, permettant de couvrir la plus grande partie de la vision de l'utilisateur [JIN, MA et LIU, 2020], la SAR (*Spatial Augmented Reality*) [PARK et al., 2015] ou encore les lunettes intelligentes [KOSMOPOULOS et STYLIARAS, 2018].

Concernant les dispositifs audio, il a été montré que le son spatialisé favorise l'immersion [F. Z. KAGHAT et al., 2020 ; ZHOU et al., 2007]. Les dispositifs présentant cette caractéristique seront donc considérés comme immersifs et les autres semi-immersifs. Enfin, les interfaces haptiques sont, par essence, des systèmes immersifs qui fournissent un retour de force kinesthésique aux utilisateurs [VAZ et al., 2020]. Nous considérerons que les systèmes olfactifs et gustatifs sont par essence également immersifs.

Sur bases de ces caractéristiques et de leur impact sur l'immersion de l'utilisateur, un arbre de décision a été créé afin de déterminer le degré avec lequel un dispositif de réalité augmentée favorise l'immersion (Figure 28). Ce degré d'immersion va de 1 (peu immersif) à 3 (immersif). Dans le cas où le tracking serait hybride, nous tiendrons compte du plus immersif.

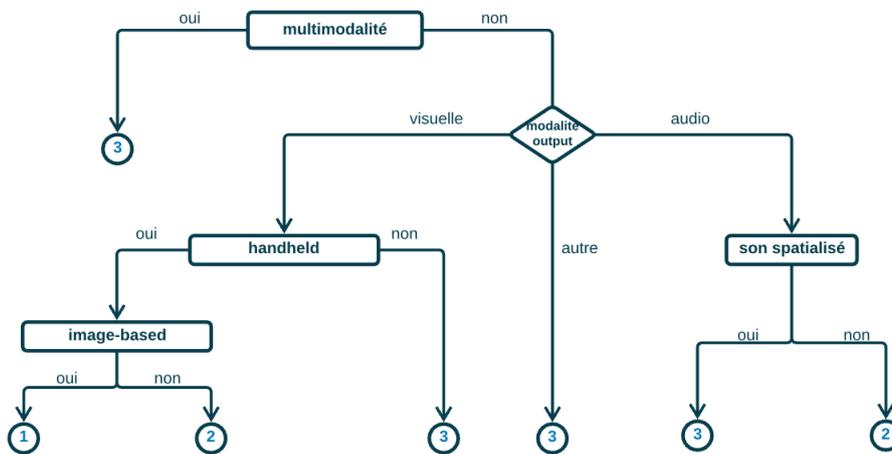


FIGURE 28 – Évaluation du degré d'immersion d'un dispositif de réalité augmentée sur base de caractéristiques techniques - échelle de 1 à 3, du moins immersif au plus immersif

L'activité suivante est celle de communication, qu'elle soit entre l'institution et le visiteur, entre visiteurs ou avec le monde extérieur. La communication entre visiteurs peut l'être dans le cadre d'utilisation de systèmes collaboratifs ou pour le partage d'expérience ou de contenu. Ce partage est également ce qui est représenté par la communication avec le monde extérieur. Quant à la communication entre l'institution et les visiteurs, elle semble être assez marginale. La collaboration entre visiteurs et le partage de contenu ou d'expérience seront donc retenus comme caractéristiques.

La dernière est l'activité de personnalisation, qui comprend la personnalisation de contenu, l'aide à la planification de la visite et l'engagement personnalisé avec les artefacts. Cette dimension est presque gardée telle quelle puisque sont conservées comme caractéristiques la personnalisation de contenu et la personnalisation d'itinéraire.

L'apport *encourager la participation du visiteur* ne se retrouve dans aucune des dimensions présentées ci-dessus. Cependant, la mise en place d'un système de réalité augmentée destiné au public au sein d'une institution culturelle est directement liée à l'attrait et la participation du visiteur, il ne sera donc pas retenu dans le cadre de cette taxonomie.

La dernière dimension manquante à cette taxonomie est celle liée à l'*inclusion*. Concernant les systèmes de réalité augmentée favorisant l'accès des personnes souffrant de handicaps sensoriels (auditif ou visuel) au patrimoine culturel, il est nécessaire d'assurer la disponibilité des mêmes informations sous différentes formes [BARBOSA et al., 2019], mais également de pouvoir accéder à ces informations sous différentes formes. En effet, l'accessibilité multisensorielle est considérée particulièrement importante pour l'inclusion, avec la traduction de données environnementales en modalités sensorielles alternatives, permettant de vivre des expériences sensorielles supplémentaires ou améliorées [SHEEHY et al., 2019]. De plus, la redondance des modalités d'entrées est appréciée par les utilisateurs de systèmes multimodaux [OVIATT, 1999], représentant alors un avantage pour tous les utilisateurs du système, souffrant d'un handicap ou non. Cette nécessité de permettre l'accès et d'assurer la

disponibilité d'une information sous différente forme peut être abordée grâce au modèle MMMM (v2) (pour *Multimodal Man Machine Model*, 2e version) [DUMAS et al., 2017]. Celui-ci décrit comment les modalités peuvent être fusionnées dans un système multimodal interactif et présente à la fois le côté utilisateur et celui du système (Figure 29).

En considérant les exigences énoncées ci-dessus, il faudra donc que le système as-

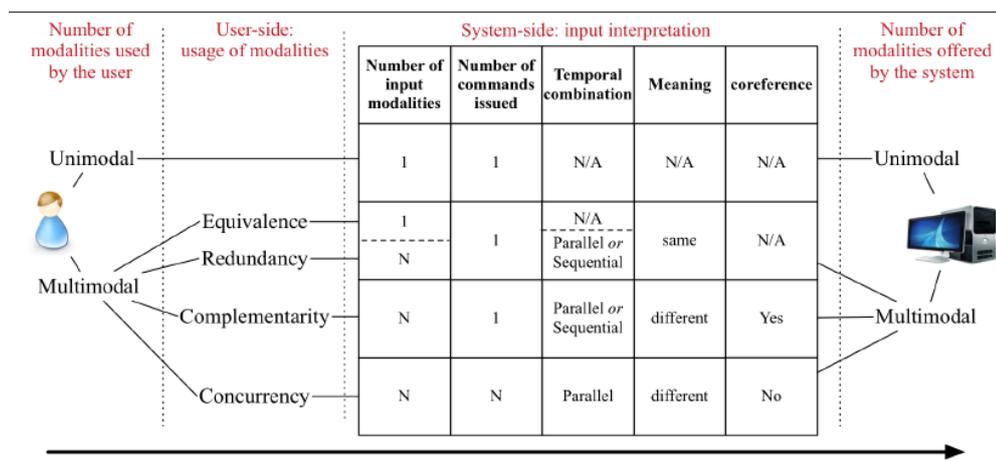


FIGURE 29 – MMMM - [DUMAS et al., 2017]

sure une redondance en entrée et en sortie pour assurer une accessibilité aux personnes ayant un déficit auditif ou visuel. Cette approche ne correspond cependant pas exactement à ce que nous souhaitons développer dans le cadre de ce travail, à savoir l'inclusion des personnes souffrant d'un handicap visuel exclusivement. Il est alors nécessaire de la préciser pour qu'elle soit davantage appropriée à cette problématique. Pour les personnes ayant un déficit visuel, la combinaison des modalités haptiques et auditives est la plus adaptée [OLANIYAN et al., 2020]. De plus, nous avons vu au point 2.3.6 que si la modalité d'entrée est tactile ou gestuelle alors un dispositif peut avoir en sortie uniquement un signal audio.

Pour être considéré comme favorisant l'accès d'une personne souffrant d'un handicap visuel au patrimoine culturel, le système devra donc, outre le fait évident qu'il ne nécessite pas l'utilisation de la vue, répondre à au moins une des caractéristiques suivantes :

- en sortie : redondance ou complémentarité haptique/auditif
- en entrée : toucher ou gestuel, et en sortie : audio

Enfin, si en sortie une modalité visuelle est ajoutée, il faut que celle-ci soit redondante pour que le système puisse être considéré comme étant inclusif. S'il s'agit de modalités olfactives et/ou gustatives le système sera toujours considéré comme étant inclusif, qu'elles soient redondantes ou complémentaires.

Enfin, afin de pallier le manque d'objectivité de l'attribution d'un score à une activité, celui-ci est abandonné au profit d'une subdivision plus précise (caractéristiques) de chaque dimension.

3.2.2 Présentation

Suite à notre analyse, les dimensions et caractéristiques suivantes ont donc été retenues :

- **Immersion** : dans quelle mesure le dispositif de réalité augmentée favorise-t-il l'immersion de l'utilisateur ? Sur base de l'arbre de décision présenté précédemment :
 - *faible* : le dispositif a un score de 1 d'après notre évaluation, il est peu immersif;
 - *moyenne* : le dispositif a un score de 2 d'après notre évaluation, il est moyennement immersif;
 - *immersive* : le dispositif a un score de 3 d'après notre évaluation, il est immersif.
- **Personnalisation** : le système propose un contenu personnalisé au profil de l'utilisateur. Deux facteurs ont été retenus comme pouvant être personnalisés :
 - *œuvre* : le contenu proposé à l'utilisateur concernant l'œuvre (artefact dans un musée, bâtiment, site archéologique, ...) est adapté à son profil

et/ou de son comportement durant la visite ;

- *itinéraire* : le système sert de guide à l'utilisateur et lui propose un itinéraire susceptible de l'intéresser, sur base de son profil et/ou de son comportement durant la visite ;
- *mixte* : l'œuvre et l'itinéraire sont personnalisés ;
- *pas de personnalisation* : le contenu proposé par le système de réalité augmentée est le même pour chaque utilisateur.

– **(Re)construction virtuelle** : le système propose une (re)construction virtuelle, liée à un lieu, un artefact, une exposition, ... Celle-ci peut être réelle ou imaginaire.

- *artefact/œuvre* ;
- *contexte/environnement* : l'environnement qui devrait normalement entourer l'œuvre exposée est reconstruit. Il peut s'agir de la contextualiser spatialement, temporellement, ... ;
- *mixte* : concerne l'œuvre et son contexte ;
- *pas de reconstruction virtuelle*.

– **Communication** :

- *collaboration* : entre visiteurs durant l'utilisation du système. Les expériences collectives favorisées par l'utilisation de la réalité augmentée entrent dans cette catégorie, même s'il peut ne pas s'agir de collaboration au sens strict ;
- *partage d'expérience et/ou de contenu* : pendant ou après l'utilisation du système ;
- *mixte* : collaboration et partage ;
- *pas de communication*.

Inclusion : le dispositif proposé favorise-t-il l'inclusion de personnes souffrant d'un handicap sensoriel ? Sur base des caractéristiques présentées précédemment :

- oui ;
- non.

3.3 Mise en application de la taxonomie

La taxonomie établie au point 3.2.2 va maintenant nous permettre de classer une sélection d'articles. Cette sélection a été réalisée selon la méthodologie suivante :

- les recherches ont été réalisées dans *Google Scholar*, *Scopus* et *Science Direct*
- avec l'expression de recherche ("augmented reality" AND (museum OR museums OR gallery OR galleries OR "cultural heritage" OR "heritage context"))
- entre 2010 et 2020
- dans les titres, résumés et mots-clés pour *Scopus* et *Science Direct*, uniquement dans le titre pour *Google Scholar* (la recherche dans les résumés et mots-clés n'étant pas disponible)

Suite à cette recherche, nous avons obtenu 140 résultats dans *Google Scholar*, 51 résultats dans *Science Direct* et 991 dans *Scopus*. Nous avons alors supprimé les doublons et appliqué les critères de sélection suivants :

– **critères d'inclusion :**

- articles
- décrivant la mise en place effective d'un système de réalité augmentée appliqué à un musée/galerie/site historique
- décrivant un système destiné à un public de visiteurs (et non à la gestion d'un musée par exemple)
- en français ou en anglais
- présentant assez d'informations pour pouvoir évaluer les différentes dimensions de la taxonomie

– **critères d'exclusion :**

- livres, *reviews*, *surveys*, thèses et mémoires
- applications destinées aux musées virtuels

De plus, si plusieurs articles décrivaient un même projet, nous avons conservé le plus récent.

Le résultat de cette démarche nous a donné 163 articles, que nous avons analysés et classés. Le résultat de cette analyse se trouve en Table 1.

TABLE 1 – Mise en application de la taxonomie

Référence	Immersion	Personnalisation	(Re)Construction	Communication	Inclusion
[A. F. ABATE et al., 2011]	immersive	itinéraire	contexte	non	non
[A. ABATE et al., 2018]	faible	non	œuvre	non	non
[ABDRABOU et al., 2018]	faible	itinéraire	non	collaboration	non
[ALJABAR et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[ALVARO-TORDESILLAS et al., 2019]	faible	non	non	collaboration	non
[ANDRADE et DIAS, 2020]	moyenne	non	mixte	partage	non
[ANGANI et al., 2020]	immersive	non	œuvre	non	non
[ANTONIOU et al., 2020]	faible	non	contexte	non	non
[ARIAS-ESPINOZA et al., 2018]	faible	non	œuvre	non	non
[BAKER et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[BANTERLE et al., 2017]	faible	non	œuvre	non	non
[BARRILE, FOTIA, BILOTTA et DE CARLO, 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[BARRILE, FOTIA, PONTERIO et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[BARRILE et al., 2018]	moyenne	non	œuvre	non	non
[BASBALLE et HALSKOV, 2010]	immersive	non	contexte	non	non
[BELLINI et al., 2013]	moyenne	non	non	mixte	non
[BELLOLI et al., 2020]	immersive	non	œuvre	non	non
[BERLINO et al., 2020]	faible	non	œuvre	non	non
[BERNIK et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[BLANCO-PONS, CARRIÓN-RUIZ, DUONG et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[BLANCO-PONS, CARRIÓN-RUIZ, LERMA et al., 2019]	moyenne	non	œuvre	non	non
[R. G. BOBOC et al., 2019]	moyenne	non	mixte	non	non
[R. BOBOC et al., 2017]	faible	non	œuvre	non	non
[BOLOGNESI, 2018]	faible	non	œuvre	non	non
[BOLOGNESI et AIELLO, 2019]	faible	non	non	non	non
[BOZZELLI et al., 2019]	moyenne	non	mixte	non	non
[BRANCATI et al., 2016]	immersive	non	non	non	non
[BREUSS-SCHNEEWEIS, 2016]	faible	non	non	non	non
[BRUNO et al., 2019]	moyenne	non	mixte	non	non

Référence	Immersion	Personnalisation	(Re)Construction	Communication	Inclusion
[CANCIANI et al., 2016]	faible	non	œuvre	non	non
[CANNELLA, 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[CAPUANO et al., 2016]	faible	itinéraire	non	non	non
[CARDOSO et al., 2020]	moyenne	non	non	non	non
[CARULLI et BORDEGONI, 2020]	immersive	non	contexte	non	non
[ČEJKA et al., 2020]	moyenne	non	mixte	non	non
[CESÁRIO et al., 2020]	faible	non	œuvre	non	non
[CHAN et al., 2013]	moyenne	non	œuvre	non	non
[CHANG et al., 2014]	faible	non	non	non	non
[CHATZIDIMITRIS et al., 2013]	faible	non	non	partage	non
[CHEN et al., 2014]	faible	non	œuvre	non	non
[CHIU et al., 2019]	faible	non	non	non	non
[CLIFFE et al., 2019]	immersive	non	contexte	non	non
[CLIFFE et al., 2020]	immersive	non	contexte	non	non
[CLINI et al., 2014]	faible	non	non	non	non
[COELHO et COSTA, 2017]	faible	non	non	partage	non
[CUSHING et COWAN, 2017]	faible	non	contexte	non	non
[D'AGNANO et al., 2020]	moyenne	œuvre	non	non	oui
[D'AURIA et al., 2014]	immersive	itinéraire	contexte	non	non
[DAMALA et STOJANOVIC, 2012]	immersive	œuvre	non	non	non
[DAMALA et al., 2016]	faible	itinéraire	non	non	non
[DE PAOLIS et al., 2018]	faible	non	œuvre	non	non
[DEBENHAM et al., 2011]	faible	non	œuvre	non	non
[DELA CRUZ et al., 2018]	faible	non	œuvre	non	non
[DIMA et al., 2014]	immersive	non	œuvre	non	non
[DUGULEANA et al., 2016]	faible	non	œuvre	non	non
[FAKHOUR et al., 2020]	moyenne	non	contexte	non	non
[FENU et PITTARELLO, 2018]	faible	non	mixte	non	non
[FLYNN, 2013]	immersive	non	œuvre	collaboration	non
[FRANZ, ALNUSAYRI et al., 2019]	immersive	non	mixte	partage	non
[FUSTÉ-FORNÉ, 2020]	immersive	non	œuvre	non	non
[GARDONI et al., 2020]	immersive	non	mixte	non	non
[GAROFALO, 2019]	immersive	non	œuvre	non	non

Référence	Immersion	Personnalisation	(Re)Construction	Communication	Inclusion
[GAROZZO et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[GERMAN et al., 2018]	immersive	œuvre	œuvre	collaboration	non
[GIMENO et al., 2011]	immersive	non	mixte	collaboration	non
[GIMENO et al., 2017]	moyenne	non	mixte	non	non
[GRAMMENOS et al., 2011]	immersive	non	contexte	non	non
[GRECI, 2016]	faible	non	non	partage	non
[GUEDES et al., 2020]	faible	non	non	non	non
[GÜLEÇ ÖZER et al., 2016]	faible	non	œuvre	non	non
[GUTIERREZ et al., 2015]	faible	non	œuvre	non	non
[HAMMADY et al., 2020]	immersive	non	mixte	mixte	non
[HAN et al., 2019]	immersive	non	non	non	non
[HARRINGTON et al., 2019]	immersive	non	mixte	non	non
[HAYDAR et al., 2011]	immersive	non	œuvre	non	non
[HOOK et al., 2013]	faible	non	œuvre	non	non
[HUANG et al., 2019]	immersive	non	non	non	non
[HURST et al., 2019]	immersive	non	mixte	non	non
[JAKOBSEN et al., 2017]	moyenne	non	mixte	non	non
[JEVREMOVIC et PETROVSKI, 2012]	faible	non	œuvre	partage	non
[JIN, MA et LI, 2020]	immersive	non	mixte	non	non
[F. KAGHAT et CUBAUD, 2010]	immersive	non	contexte	non	non
[F. Z. KAGHAT et al., 2020]	immersive	itinéraire	mixte	non	non
[KAKAROUNTAS et al., 2014]	immersive	œuvre	non	non	non
[KANG, 2013]	faible	non	non	non	non
[KASAPAKIS et al., 2016]	moyenne	non	œuvre	non	non
[KEIL et al., 2013]	faible	œuvre	œuvre	non	non
[KELLY et al., 2017]	immersive	non	mixte	non	non
[KENDERDINE et al., 2014]	moyenne	non	mixte	non	non
[M. KHAN, 2014]	immersive	non	mixte	non	non
[M. A. KHAN et al., 2020]	faible	non	non	non	non
[S. KIM et al., 2019]	immersive	non	mixte	non	non
[T. KIM et al., 2013]	immersive	non	œuvre	collaboration	non
[KOLSTEE et VAN ECK, 2011]	immersive	non	œuvre	non	non
[KOO et al., 2019]	faible	non	non	non	non
[KRATKY, 2015]	immersive	non	non	non	non
[KVĚTINA et al., 2015]	faible	non	mixte	non	non

Référence	Immersion	Personnalisation	(Re)Construction	Communication	Inclusion
[LEACH et al., 2018]	moyenne	non	œuvre	non	non
[LEE et al., 2015]	immersive	non	œuvre	non	non
[LEE et al., 2019]	immersive	non	œuvre	non	non
[LEOPARDI et al., 2020]	immersive	œuvre	non	non	non
[LI et al., 2019]	faible	itinéraire	œuvre	collaboration	non
[C. M. LIN et al., 2013]	faible	non	œuvre	non	non
[T.-G. LIN et al., 2019]	faible	non	mixte	non	non
[LITVAK et KUFLIK, 2020]	immersive	non	non	non	non
[MADSEN et MADSEN, 2015]	faible	non	œuvre	non	non
[MANIELLO, 2019]	immersive	non	œuvre	non	non
[MANN et FRYAZINOV, 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[MARTÍNEZ et al., 2018]	immersive	non	œuvre	collaboration	non
[MARTO et GONÇALVES, 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[MASON, 2016]	immersive	non	non	non	non
[MAURIZIO et al., 2017]	faible	itinéraire	œuvre	non	non
[MERIEM et al., 2018]	moyenne	non	non	partage	non
[MIYATA et al., 2011]	immersive	non	œuvre	non	non
[MOHAMMED-AMIN et al., 2012]	faible	non	œuvre	non	non
[MORGANTI et BARTOLOMEI, 2018]	faible	non	non	non	non
[NARCISO et al., 2015]	moyenne	non	œuvre	non	non
[OHASHI et al., 2019]	faible	non	non	non	non
[OHLEI et al., 2018]	faible	œuvre	œuvre	non	non
[OLEKSY et WNUK, 2016]	faible	non	œuvre	non	non
[OSAWA et al., 2016]	faible	non	non	non	non
[OZDEN et al., 2014]	faible	non	non	non	non
[PALIOKAS et al., 2020]	faible	non	œuvre	non	non
[PANOU et al., 2018]	moyenne	non	œuvre	non	non
[PEDERSEN et al., 2017]	immersive	non	œuvre	non	non
[PERRA et al., 2019]	faible	non	non	non	non
[PETRELLI, 2019]	moyenne	non	mixte	non	non
[PETRUCCO et AGOSTINI, 2016]	moyenne	non	mixte	non	non
[PIERDICCA et al., 2016]	moyenne	non	non	non	non
[PIERDICCA et al., 2015]	faible	non	œuvre	non	non
[PIKOV et al., 2015]	faible	non	œuvre	non	non

Référence	Immersion	Personnalisation	(Re)Construction	Communication	Inclusion
[POCE et al., 2019]	faible	non	non	non	non
[POLLALIS et al., 2017]	immersive	non	œuvre	non	non
[POLLALIS et al., 2018]	immersive	non	œuvre	non	non
[PURNOMO et al., 2018]	faible	non	œuvre	non	non
[PUSPASARI et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[RAMIREZ et al., 2013]	faible	non	œuvre	non	non
[RIDEL et al., 2014]	immersive	non	œuvre	non	non
[RODRIGO et al., 2019]	faible	non	œuvre	non	non
[RODRIGUES et al., 2019]	immersive	itinéraire	mixte	non	non
[ROLDAN et al., 2019]	immersive	non	œuvre	collaboration	non
[RYFFEL et al., 2017]	faible	non	œuvre	non	non
[SAUTER et al., 2019]	faible	non	non	non	non
[SEE et al., 2017]	faible	non	œuvre	non	non
[SHAKOURI et TIAN, 2019]	moyenne	non	œuvre	non	non
[SIMONETTOA et al., 2013]	faible	non	œuvre	non	non
[SPRUNG et HAXHA, 2020]	moyenne	non	œuvre	collaboration	non
[STANCO et al., 2012]	faible	non	œuvre	non	non
[SUGIURA et al., 2019](a)	faible	non	non	non	non
[SUGIURA et al., 2019](b)	immersive	non	non	non	non
[SULAIMAN et al., 2019]	faible	non	mixte	non	non
[SUPRIYONO et al., 2020]	faible	non	œuvre	non	non
[THEODORAKOPOULOS et al., 2017]	immersive	mixte	contexte	non	non
[TORRES-RUIZ et al., 2020]	moyenne	itinéraire	non	non	non
[VANONI et al., 2012]	faible	non	œuvre	non	non
[VAZQUEZ-ALVAREZ et al., 2016]	immersive	non	mixte	non	non
[VERYKOKOU et al., 2014]	faible	non	œuvre	non	non
[C.-S. WANG, 2019]	faible	itinéraire	non	non	non
[C.-S. WANG et al., 2018]	moyenne	itinéraire	non	non	non
[WHITESIDE et al., 2014]	faible	non	non	non	non
[WINZER et al., 2017]	faible	non	contexte	non	non
[YANG et CHAN, 2019]	immersive	non	contexte	non	non
[YOUNES et al., 2017]	moyenne	non	œuvre	non	non

3.4 Analyse

Parmi ces 163 dispositifs analysés entre 2010 et 2020, la majorité (72%) ont été mis en place après 2015 et près de la moitié (43%) date de 2019 et 2020.

Nous allons maintenant analyser les résultats obtenus pour chaque dimension.

Immersion

La moitié des dispositifs a été classée dans la catégorie *peu immersif* (Figure 30). D'après notre système d'attribution de niveau d'immersion, cela signifie que la moitié des systèmes utilisent des dispositifs portables, tels que des smartphones ou tablettes, dont le tracking est basé sur les images, que ce soit de type *QRcodes* ou reconnaissance d'images. La proportion de systèmes peu immersifs est la même pour les systèmes développés entre 2010 et 2015 que pour ceux développés ces cinq dernières années (51%). Une légère diminution est cependant perceptible pour les systèmes développés en 2019-2020 (47%). De plus, si 9% des systèmes développés entre 2010 et 2015 étaient moyennement immersifs, ils étaient 19% à l'être pour les cinq années suivantes. Cette évolution du degré d'immersion pourrait s'expliquer par l'évolution matérielle des différentes technologies.

Nous pouvons faire un parallèle avec la taxonomie de Pucihar dont nous avons repris la dimension d'immersion, afin de comparer les niveaux d'immersion attribués pour l'évaluation d'un même système. Leur évaluation étant basée sur un ressenti, il serait intéressant de savoir si cette attribution subjective correspond aux résultats obtenus avec notre méthode. Étonnement, seulement six articles analysés par Pucihar se sont retrouvés également dans nos recherches (la méthode de recherche et sélection d'articles n'était pas précisée et s'y retrouve un nombre non négligeable d'articles antérieurs à 2010) :

- le système de [KASAPAKIS et al., 2016] a été considéré comme étant moyennement immersif dans notre taxonomie, alors que d'après Pucihar il ne présentait pas cette activité appelée *sensible*, correspondant à l'immersion dans le cadre de ce travail. Cette disparité se retrouve également pour le système de [DAMALA

et STOJANOVIC, 2012] qui est considéré comme immersif dans ce travail alors que pour Pucihar il a un score minimal ;

- des similitudes sont également observées : pour le système de [KENDERDINE et al., 2014] le score correspondant à *moyennement immersif* a été attribué des deux côtés et ceux de [PIERDICCA et al., 2015], [KEIL et al., 2013] et [CHATZIDIMITRIS et al., 2013] sont considérés comme étant des systèmes peu immersifs dans les deux taxonomies.

De plus, nous observons par exemple qu'un système *handheld marker-based* ([LU et al., 2014]) a un score maximal pour l'activité sensible, alors qu'il serait au minimum dans notre taxonomie.

Personnalisation

Concernant la dimension de *personnalisation*, celle-ci est assez peu représentée. En effet, seuls 12% des systèmes étudiés proposent du contenu personnalisé à l'utilisateur, que ce soit un itinéraire personnalisé (7%), du contenu associé aux œuvres (4%) ou mixte (1%) (Figure 31). Aucune différence significative n'est également remarquée entre les systèmes les plus anciens (11% de ceux développés entre 2010 et 2015 proposent un contenu personnalisé) et ceux développés ces dernières années (13% pour la période 2016-2020).

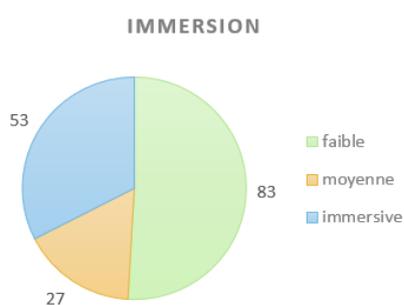


FIGURE 30 – Répartition de l'immersion

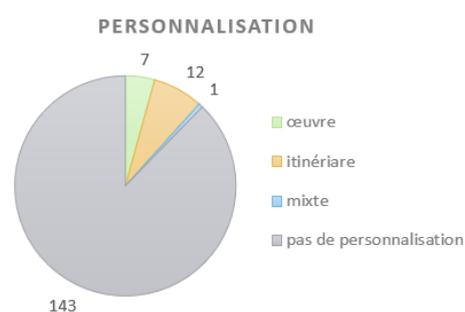


FIGURE 31 – Répartition de la personnalisation

(Re)Construction

Si la majorité des systèmes propose une forme de (re)construction virtuelle (Figure 32), 26% d'entre eux proposent un autre type de contenu. Il s'agit généralement de dispositifs affichant un complément d'information concernant les artefacts de l'exposition, sous la forme de texte, d'une vidéo, d'une image, etc. Parmi celles présentant un contenu sous la forme de (re)construction, deux tiers concernent les œuvres exclusivement, près d'un quart les œuvres et leurs contextes, et seulement 12% proposent une (re)construction ne concernant que le contexte. Là encore le pourcentage de (re)construction est similaire entre les dispositifs plus récents et les plus anciens.

Communication

Tout comme l'aspect de la personnalisation, celui de la communication est très peu développé (Figure 33). Parmi les systèmes proposant cette fonctionnalité, la collaboration et le partage sont plus ou moins sur un pied d'égalité.

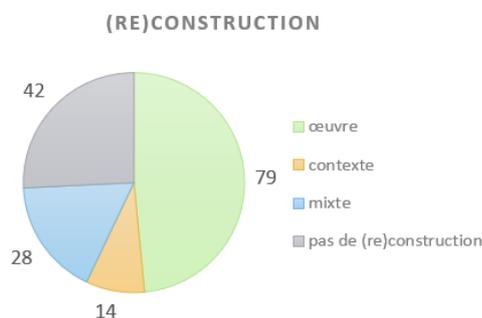


FIGURE 32 – Répartition de la (re)construction

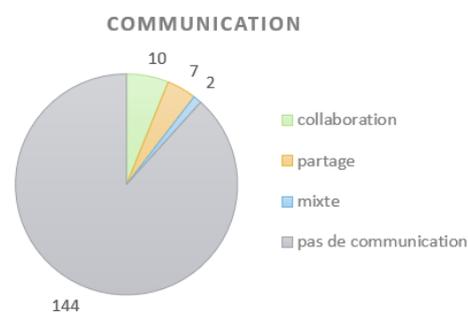


FIGURE 33 – Répartition de la communication

Inclusion

Une seule application parmi celles évaluées peut être considérée comme étant adaptée à un public de personnes malvoyantes (Figure 34), il s'agit de *Tooteko* présentée au point 2.3.6. Un système se voulait accessible pour ce public aux besoins spécifiques [GUEDES et al., 2020] mais ne répondait pas à nos critères d'inclusion. Il

s'agit d'une application destinée à des appareils de type *handheld* affichant de l'information sous forme d'un texte concernant l'œuvre lorsque l'utilisateur scanne le *QRcode* qui y est lié. Le texte est disponible à l'écoute mais l'utilisation de la vue est nécessaire pour avoir accès à ces informations. Elle permet cependant l'accès à une certaine catégorie de personnes malvoyantes, mais certainement pas à celles souffrant de cécité.

Si nous devions évaluer le système de [STANCO et al., 2017] décrit au point 2.3.6 avec notre taxonomie, celui-ci ne serait pas considéré comme étant *inclusif* non plus car seule la modalité haptique est utilisée en sortie. S'il est vrai que ce dispositif permet à des personnes malvoyantes de parcourir et de ressentir la sculpture de manière virtuelle, elle ne la rend pas réellement intelligible. En effet, si le visiteur venait à parcourir de la même manière le modèle imprimé en trois dimensions, il n'aurait pas moins d'information qu'avec le dispositif haptique. Comme nous l'avons vu au point 2.3, l'objectif d'une application de médiation est de rendre intelligibles les artefacts. Il serait alors intéressant de combiner ce dispositif haptique avec des commentaires auditifs directement liés à la zone de l'œuvre qui est touchée, comme pour [D'AGNANO et al., 2020; REICHINGER et al., 2016], ce qui permettrait d'apporter une réelle plus-value au dispositif.

Si favoriser l'accès à tout type de public est un apport intéressant de la réalité augmentée, il demande par contre potentiellement un plus gros investissement que pour une application développée pour un *smartphone*, ne serait-ce que d'un point de vue matériel (la facilité avec l'utilisation d'une application mobile est que chaque visiteur utilise son propre *smartphone*). De plus, la majorité des dispositifs présentés pour les personnes souffrant d'un handicap visuel était basée sur une impression en 3D, qui est un processus assez long et coûteux, surtout pour les modèles de taille moyenne à grande et avec d'autres matériaux que de simples polymères [STANCO et al., 2017].

Il est également intéressant de noter qu'une des applications analysées est destinée à un public malentendant : il s'agit d'une application pour *smartphone* proposant quatre types de codes différents pouvant être scannés, pour que chaque visiteur ait accès au contenu sous la forme la plus adaptée à ses besoins (le contenu est disponible sous la forme textuelle, image, vidéo ou modèle 3D) [BAKER et al., 2019].

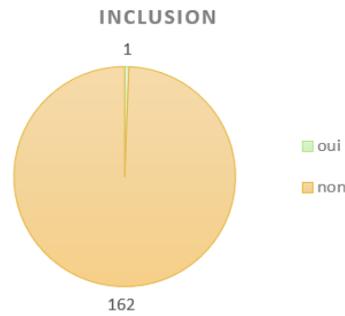


FIGURE 34 – Répartition de l'*inclusion*

3.5 Limitations

La taxonomie développée permet de classer des systèmes de réalité augmentée destinés à une utilisation liée au patrimoine culturel en fonction de ses apports à l'utilisateur, tels qu'identifiés en point 2.3. Certaines limites sont cependant à soulever quant à son application.

La dimension liée à l'*inclusion* est assez limitée puisqu'elle ne tient compte que des handicaps visuels. Il existe cependant d'autres handicaps dont il serait judicieux de tenir compte dans le cadre de l'accès au patrimoine culturel : auditif, physique, cognitif, ... De plus, nous englobons dans notre analyse tous les troubles visuels dans une seule catégorie, sans tenir compte des différents degrés de cet handicap pouvant être rencontrés. Il est également important de noter que dans notre approche nous ne tenons compte que du public présentant uniquement un handicap visuel sans tenir compte des cas de multi-handicaps.

La méthode développée pour déterminer le niveau d'*immersion* d'un système permet de tenir compte de trois des quatre caractéristiques présentées par Slater (point 2.3.4), à savoir l'aspect *inclusif*, *étendu* et *environnant*. Elle ne tient pas compte de la caractéristique *vivante* relative à la résolution, la fidélité et la richesse de la représentation. Bien que ce critère soit difficile à évaluer sans être *in situ*, le degré de réalisme a un impact sur l'immersion de l'utilisateur et il est dès lors important

d'en tenir compte lors du développement d'une application. En outre, nous avons considéré les différentes caractéristiques de Slater de manière individuelle : si un système est multimodal, alors il est étendu et donc immersif; ou si un casque HMD est utilisé alors la vision est panoramique, donc environnante et immersive. Or nous aurions pu tenir compte de la combinaison de ces différents facteurs, qui combinés renforcent l'immersion de l'utilisateur. Il y a donc un manque de granularité dans notre approche. Afin d'illustrer ce propos, reprenons le système *M5SAR* présenté au point 2.3.4 : nous avons vu que les modalités s'étendaient aux cinq sens mais que l'image et le son provenaient d'un smartphone, le rendant peu environnant pour ces modalités. L'immersion pourrait alors être plus présente en modifiant le dispositif visuel et auditif mais d'après le degré attribué avec notre évaluation il a déjà obtenu une note d'immersion maximale.

Enfin, dans le cadre de la réalité augmentée auditive, nous avons mis en avant l'importance des sons d'ambiance pour favoriser l'immersion, il aurait alors pu être intéressant de tenir également compte du contenu pour évaluer l'immersion de ces systèmes.

D'une manière générale, il pourrait être intéressant de tenir davantage compte du contenu proposé à l'utilisateur, en remaniant la dimension *(re)construction* par exemple afin qu'elle tienne compte de tous les types de contenus. En effet, là où l'absence de *communication* pour un système met en avant un point qui pourrait être développé, ce n'est pas le cas lors d'absence de *(re)construction*.

S'intéresser davantage au public cible du système, allant au-delà de l'aspect inclusif, pourrait également être une approche complémentaire intéressante : l'apport est différent pour un public scolaire, des professionnels, un public plus général, etc.

4 Conclusion

Après avoir défini ce que sont la réalité augmentée et les taxonomies, nous avons fait état des différentes taxonomies existantes pour classer des systèmes de réalité augmentée, générales dans un premier temps et spécifiques au domaine culturel et artistique dans un second temps. Nous avons ensuite abordé la mise en application de la réalité augmentée dans le cadre de la valorisation du patrimoine culturel dans des musées, galeries et sur des sites historiques, en se concentrant sur l'apport de celle-ci pour les visiteurs. Six grandes catégories d'apports ont été identifiées : favoriser la participation du visiteur ; restaurer virtuellement des artefacts ; guider le visiteur, lui proposer du contenu personnalisé et favoriser son apprentissage ; favoriser l'immersion de l'utilisateur ; favoriser les expériences sociales à travers la collaboration et le partage et favoriser l'inclusion de personnes souffrant d'un handicap, visuel en particulier.

Face au constat que peu de taxonomies sont spécifiques au patrimoine culturel et que celles-ci sont incomplètes, car ne représentent pas tous les apports, une méthodologie a été établie afin de définir une nouvelle taxonomie. Cette méthodologie est itérative est basée sur l'approche de [NICKERSON et al., 2013] et nous a permis d'établir les différentes dimensions, chacune composées de catégories.

Afin de déterminer les dimensions qui composent notre taxonomie, nous avons pris comme point de départ la taxonomie établie par [PUCIHAR et KLJUN, 2018] et l'avons repensée à la lumière des apports identifiés précédemment. Cinq dimensions ont été retenues pour cette taxonomie. La première est celle de l'*immersion*, pour laquelle une méthode d'évaluation du degré d'immersion a été développée permettant, sur

base des modalités et du matériel utilisé, de déterminer si un système est *peu immersif*, *moyennement immersif* ou *immersif*. Il s'agit plus exactement de déterminer la mesure dans laquelle un dispositif de réalité augmentée favorise l'immersion de ses utilisateurs. La seconde est celle de la *personnalisation*, qui peut être liée au profil préétabli de l'utilisateur ou à son comportement durant la visite. La personnalisation peut être liée au contenu associé à une œuvre, à un itinéraire de visite ou aux deux. La troisième est celle de la *(re)construction virtuelle* et permet de définir si le système propose un contenu de construction ou de reconstruction virtuelle d'une œuvre et/ou de son contexte. La suivante est celle de la *communication* et précise, dans le cas où le dispositif de réalité augmentée favorise la communication entre les utilisateurs, si c'est par le biais de la collaboration et/ou du partage d'expérience/de contenu. La dernière est celle de l'*inclusion* et indique si le système évalué est adapté à un public malvoyant. Des critères liés aux modalités utilisées ont été déterminés.

Afin de mettre en application cette taxonomie, 163 articles ont été sélectionnés (entre 2010 et 2020) et évalués. L'analyse des résultats a montré que la moitié des dispositifs étaient considérés comme étant peu immersifs, mais qu'ils tendaient à être plus immersifs ces dernières années. Très peu de systèmes développent l'aspect de la communication et de la personnalisation, mais ils sont une majorité à proposer un contenu de type *(re)construction virtuelle*. Enfin, une seule application était accessible aux personnes souffrant d'un handicap visuel.

Dans ce travail nous avons donc développé une approche permettant d'objectiver l'évaluation du degré d'immersion d'un système de réalité augmentée, déterminé les caractéristiques nécessaires à un système pour qu'il soit inclusif et accessible aux personnes malvoyantes et développé une taxonomie permettant de distinguer les bénéfices apportés par la réalité augmentée à un visiteur d'un lieu culturel ou artistique.

La réflexion, initiée dans ce mémoire, concernant l'accessibilité au patrimoine culturel pour les personnes malvoyantes, via la réalité augmentée, n'est qu'une première approche et il serait intéressant de la développer davantage. L'amélioration de cette dimension peut se présenter sur deux axes : premièrement, affiner l'évaluation liée aux handicaps visuels en tenant compte des différents types de déficits visuels, et deuxièmement, déterminer les critères d'inclusion pour les personnes souffrant d'un handicap, quel qu'il soit, tout en tenant compte du fait qu'ils puissent être multiples. De plus, la dimension de l'*immersion* est un point qu'il pourrait être judicieux d'affiner également, en tenant compte de la combinaison des critères définis par [SLATER et WILBUR, 1997] pour l'immersion.

Enfin, il a été mis en avant que trois dimensions sont très peu représentées : la *personnalisation*, la *communication* et l'*inclusion*. Cette sous-représentation met en avant des opportunités de développement pour des applications futures dans un cadre de valorisation du patrimoine culturel.

Bibliographie

- ABATE, A., BARRA, S., GALEOTAFIORE, G., DÍAZ, C., AURA, E., SÁNCHEZ, M., MAS, X. & VENDRELL, E. (2018). An Augmented Reality Mobile App for Museums : Virtual Restoration of a Plate of Glass. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11196 LNCS, 539-547. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01762-0_47
- ABATE, A. F., ACAMPORA, G. & RICCIARDI, S. (2011). An interactive virtual guide for the AR based visit of archaeological sites. *Journal of Visual Languages & Computing*, 22(6), 415-425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2011.02.005>
- ABDRABOU, Y., MOHSEN, F., EL MOUGY, A. & ABDENNADHER, S. (2018). CHEOPS : Cultural Heritage Enhancement over Cyber-Physical Systems [Issue : 1], In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. Issue : 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012052>
- AGARWAL, C. & THAKUR, N. (2014). The evolution and future scope of augmented reality [Publisher : International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)]. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 11(6), 59.
- AL RABBAA, J., MORRIS, A. & SOMANATH, S. (2019). MRsive : an augmented reality tool for enhancing wayfinding and engagement with art in museums (C. STEPHANIDIS, Éd.). In C. STEPHANIDIS (Éd.), *HCI international 2019 - posters*, Cham, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23525-3_73

- ALI, J. M. A. & HAMED, H. M. (2019). Employing augmented reality for reviving heritage sites : an AR vision for Qasr al-Abd in Jordan. *American Journal of Tourism Research*, 8(1), 1-10.
- ALIPRANTIS, J. & CARIDAKIS, G. (2019). A survey of augmented reality applications in cultural heritage : *International Journal of Computational Methods in Heritage Science*, 3(2), 118-147. <https://doi.org/10.4018/IJCMHS.2019070107>
- ALJABAR, A. A. H., CAHYONO, A. B. & HIDAYAT, H. (2019). Application of augmented reality and close range photogrammetry technology for mapping of cultural heritage areas (case study : Ai Renung Site, Sumbawa Regency) [Issue : 1], In *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, IOP Publishing. Issue : 1.
- ALVARO-TORDESILLAS, A., CRESPO-ALLER, S. & BARBA, S. (2019). ARTALIVE : AN ANDROID APPLICATION for AUGMENTED REALITY WITHOUT MARKERS, BASED on ANAMORPHIC IMAGES [Issue : 2/W15], In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Issue : 2/W15. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-71-2019>
- AMAKAWA, J. & WESTIN, J. (2018). New Philadelphia : Using augmented reality to interpret slavery and reconstruction era historical sites [Publisher : Taylor & Francis]. *International Journal of Heritage Studies*, 24(3), 315-331.
- ANDRADE, J. & DIAS, P. (2020). A phygital approach to cultural heritage : Augmented reality at regaleira [Publisher : Universitat Politècnica de València]. *Virtual Archaeology Review*, 11(22), 15-25. <https://doi.org/10.4995/var.2020.11663>
- ANGANI, A., TALLURI, T., LEE, J.-W., KIM, E. & LEE, J. (2020). Realization of 3d aquahologram augmented reality of robot fish [Publisher : M Y U Scientific Publishing Division]. *Sensors and Materials*, 32(10), 3507-3516. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2927>
- ANTONIOU, A., DIAKOUMAKOS, J., LEPOURAS, G., AGGELAKOS, Y., KASTRITSIS, A. & PLATIS, N. (2020). "Take me Home" : AR to connect exhibits to excavation sites, In *CEUR Workshop Proceedings*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85093663135&partnerID=40&md5=874e4c738c923b56b5524909bb5bfdbc>
- ARIAS-ESPINOZA, P., MEDINA-CARRION, A., ROBLES-BYKBAEV, V., ROBLES-BYKBAEV, Y., PESANTEZ-AVILES, F., ORTEGA, J., MATUTE, D. & ROLDAN-MONSALVE, V.

- (2018). E-Pumapunku : An Interactive App to Teach Children the Cañari and Inca Indigenous Cultures during Guided Museum Visits, In *2018 Congreso Internacional de Innovacion y Tendencias en Ingenieria, CONIITI 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/CONIITI.2018.8587097>
- ARTH, C., GRASSET, R., GRUBER, L., LANGLOTZ, T., MULLONI, R., SCHMALSTIEG, D. & WAGNER, D. (2015). The History of Mobile Augmented Reality Developments in Mobile AR over the last almost 50 years.
- AZUMA, R. T. (1997). A survey of augmented reality [Publisher : MIT Press]. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4), 355-385.
- BAAZIZ, A. (2018). Smart Muséums : Vers l'émergence de nouvelles médiations muséales. *AIDAinformazioni : Rivista di Scienze dell'informazione*, 36(3), 9-36. <https://doi.org/10.4399/97888255225252>
- BAIG, M. Z. & KAVAKLI, M. (2020). Multimodal Systems : Taxonomy, Methods, and Challenges. *arXiv preprint arXiv :2006.03813*.
- BAKER, E., BAKAR, J., ZULKIFLI, A. & OMAR, A. (2019). Development of the MARHIME app embedding the mobile augmented reality for hearing-impaired museum visitors engagement model [Publisher : Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Publication]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(8), 363-368. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85071478506&partnerID=40&md5=eb8e03f3c94abca8310d20dedd75d817>
- BANTERLE, F., CARDILLO, F., MALOMO, L., PINGI, P., GABELLONE, F., AMATO, G. & SCOPIGNO, R. (2017). LecceAR : An augmented reality app, In *Digital Presentation and Preservation of Cultural and Scientific Heritage*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85095756993&partnerID=40&md5=9267753b71d85c6a98d3337553b1e6d3>
- BARBOSA, P., AMORIM, P. & LEAL FERREIRA, S. B. (2019). Augmented reality and museum accessibility : a case study to support hard of hearing people, In *Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*.
- BARRILE, V., FOTIA, A., BILOTTA, G. & DE CARLO, D. (2019). Integration of geomatics methodologies and creation of a cultural heritage app using augmented reality [Integración de metodologías geomáticas y creación de una aplicación patrimonial usando realidad aumentada] [Publisher : Universitat Politècnica

- de Valencia]. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 40-51. <https://doi.org/10.4995/var.2019.10361>
- BARRILE, V., FOTIA, A., PONTERIO, R., MOLLICANARDO, V., GIUFFRIDA, D. & MASTELLONI, M. A. (2019). A Combined Study of Art Works Preserved in the Archaeological Museums : 3D Survey, Spectroscopic Approach and Augmented Reality. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- BARRILE, V., FOTIA, A. & BILOTTA, G. (2018). Geomatics and augmented reality experiments for the cultural heritage [Publisher : Springer]. *Applied Geomatics*, 10(4), 569-578.
- BASBALLE, D. & HALSKOV, K. (2010). Projections on museum exhibits - Engaging visitors in the museum setting, In *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/1952222.1952240>
- BEKELE, M. K., PIERDICCA, R., FRONTONI, E., MALINVERNI, E. S. & GAIN, J. (2018). A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 11(2), 7.
- BELLINI, A., LUDDI, C., NALDINI, S., GHETTI, C., BELLINI, E. & BERGAMIN, G. (2013). 'Once upon a time' : A proof of concept augmented reality collaborative mobile application to discover city heritage, In *Proceedings - 2013 International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems, SITIS 2013*. <https://doi.org/10.1109/SITIS.2013.65>
- BELLOLI, S., PORRO, S., VIRK, V., ETZI, R., GALLACE, A., BORDEGONI, M. & CARULLI, M. (2020). The kandinsky experience : A multisensory augmented reality application for cultural heritage [Publisher : CAD Solutions, LLC]. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(4), 799-814. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.799-814>
- BERLINO, A., CAROPRESE, L., VOCATURO, E. & ZUMPARNO, E. (2020). A mobile application for the enhancement of POIs in Calabria, In *CEUR Workshop Proceedings*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85093830425&partnerID=40&md5=292e3efd90ae04cfa7724de61e3e2622>
- BERNARDO, Á. (2016). *Museums that are Accessible Thanks to Technology*. OpenMind.
- BERNIK, A., VUSIĆ, D. & KOBER, D. (2019). Implementation of augmented reality application and computer graphics : The case of the stolen paintings [Publisher :

- Strojarski Facultet]. *Tehnicki Vjesnik*, 26(6), 1570-1575. <https://doi.org/10.17559/TV-20181015160248>
- BILLINGHURST, M., CLARK, A. & LEE, G. (2015). A survey of augmented reality.
- BLANCO-PONS, S., CARRIÓN-RUIZ, B., DUONG, M., CHARTRAND, J., FAI, S. & LERMA, J. L. (2019). Augmented reality markerless multi-image outdoor tracking system for the historical buildings on parliament hill [Number : 16 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Sustainability*, 11(16), 4268. <https://doi.org/10.3390/su11164268>
- BLANCO-PONS, S., CARRIÓN-RUIZ, B., LERMA, J. L. & VILLAVERDE, V. (2019). Design and implementation of an augmented reality application for rock art visualization in Cova dels Cavalls (Spain). *Journal of Cultural Heritage*, 39, 177-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.03.014>
- BOBOC, R. G., DUGULEANĂ, M., VOINEA, G.-D., POSTELNICU, C.-C., POPOVICI, D.-M. & CARROZZINO, M. (2019). Mobile augmented reality for cultural heritage : following the footsteps of ovid among different locations in europe [Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Sustainability*, 11(4), 1167. <https://doi.org/10.3390/su11041167>
- BOBOC, R., GÎRBACIA, F., DUGULEANĂ, M. & TAVČAR, A. (2017). A handheld augmented reality to revive a demolished reformed church from braşov, In *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3110292.3110311>
- BOLOGNESI, C. & AIELLO, D. (2019). Forgotten architecture : Smart tools for cultural tourism in the cloister of the prior (santa maria delle grazie, milan) [Issue : 2/W11], In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Issue : 2/W11. <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-247-2019>
- BOLOGNESI, C. (2018). Digital workflow for virtual and augmented visit of architecture. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11197 LNCS, 126-133. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01765-1_15
- BOZZELLI, G., RAIA, A., RICCIARDI, S., DE NINO, M., BARILE, N., PERRELLA, M., TRAMONTANO, M., PAGANO, A. & PALOMBINI, A. (2019). An integrated VR/AR framework for user-centric interactive experience of cultural heritage : the ArkaeVi-

- sion project. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15, e00124. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00124>
- BRANCATI, N., CAGGIANESE, G., PIETRO, G., FRUCCI, M., GALLO, L. & NERONI, P. (2016). Usability Evaluation of a Wearable Augmented Reality System for the Enjoyment of the Cultural Heritage, In *Proceedings - 11th International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems, SITIS 2015*. <https://doi.org/10.1109/SITIS.2015.98>
- BRAZ, J. M. & PEREIRA, J. M. (2008). Tarcast : Taxonomy for augmented reality casting with web support. *The International Journal of Virtual Reality*, 7(4), 47-56.
- BREUSS-SCHNEEWEIS, P. (2016). "The speaking celt" - Augmented reality avatars guide through a museum - Case study, In *UbiComp 2016 Adjunct - Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. <https://doi.org/10.1145/2968219.2974044>
- BROCKMANN, T., KRUEGER, N., STIEGLITZ, S. & BOHLSSEN, I. (2013). A framework for collaborative augmented reality applications.
- BRUNO, F., BARBIERI, L., MANGERUGA, M., COZZA, M., LAGUDI, A., ČEJKA, J., LIAROKAPIS, F. & SKARLATOS, D. (2019). Underwater augmented reality for improving the diving experience in submerged archaeological sites. *Ocean Engineering*, 190, 106487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106487>
- BYSTROM, K.-E., BARFIELD, W. & HENDRIX, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments [Publisher : MIT Press]. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2), 241-244.
- CANCIANI, M., CONIGLIARO, E., GRASSO, M. D., PAPALINI, P. & SACCONI, M. (2016). 3d survey and augmented reality for cultural heritage. the case study of Aurelian Wall at Castra Praetoria in Rome. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- CANNELLA, M. (2019). The augmented reality as an instrument for the representation/visualization of architecture. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 919, 336-344. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_36
- CAPUANO, N., GAETA, A., GUARINO, G., MIRANDA, S. & TOMASIELLO, S. (2016). Enhancing augmented reality with cognitive and knowledge perspectives : a case study in museum exhibitions [Publisher : Taylor & Francis]. *Behaviour & Information Technology*, 35(11), 968-979.

- CARDOSO, P., RODRIGUES, J., PEREIRA, J., NOGIN, S., LESSA, J., RAMOS, C., BAJIREANU, R., GOMES, M. & BICA, P. (2020). Cultural heritage visits supported on visitors' preferences and mobile devices [Publisher : Springer]. *Universal Access in the Information Society*, 19(3), 499-513. <https://doi.org/10.1007/s10209-019-00657-y>
- CARMIGNIANI, J., FURHT, B., ANISETTI, M., CERAVOLO, P., DAMIANI, E. & IVKOVIC, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications [Publisher : Springer]. *Multimedia tools and applications*, 51(1), 341-377.
- CARULLI, M. & BORDEGONI, M. (2020). Multisensory Augmented Reality Experiences for Cultural Heritage Exhibitions. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 140-151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31154-4_13
- ČEJKA, J., ZSÍROS, A. & LIAROKAPIS, F. (2020). A hybrid augmented reality guide for underwater cultural heritage sites [Publisher : Springer]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 1-14.
- CESÁRIO, V., OLIM, S. & NISI, V. (2020). A Natural History Museum Experience : Memories of Carvalhal's Palace – Turning Point. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12497 LNCS, 339-343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62516-0_31
- CHAN, L., SHAW, J. & KENDERDINE, S. (2013). Spatial user interface for experiencing mogao caves, In *SUI 2013 - Proceedings of the ACM Symposium on Spatial User Interaction*. <https://doi.org/10.1145/2491367.2491372>
- CHANG, K.-E., CHANG, C.-T., HOU, H.-T., SUNG, Y.-T., CHAO, H.-L. & LEE, C.-M. (2014). Development and behavioral pattern analysis of a mobile guide system with augmented reality for painting appreciation instruction in an art museum. *Computers & Education*, 71, 185-197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.09.022>
- CHATZIDIMITRIS, T., KAVAKLI, E., ECONOMOU, M. & GAVALAS, D. (2013). Mobile Augmented Reality edutainment applications for cultural institutions, In *IISA 2013 - 4th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*. <https://doi.org/10.1109/IISA.2013.6623726>

- CHEN, C.-Y., CHANG, B. & HUANG, P.-S. (2014). Multimedia augmented reality information system for museum guidance. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(2), 315-322. <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0647-1>
- CHIU, C.-C., WEI, W.-J., LEE, L.-C. & LU, J.-C. (2019). Augmented reality system for tourism using image-based recognition [Publisher : Springer Verlag]. *Microsystem Technologies*. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04600-2>
- CIPRESSO, P., GIGLIOLI, I. A. C., RAYA, M. A. & RIVA, G. (2018). The past, present, and future of virtual and augmented reality research : a network and cluster analysis of the literature [Publisher : Frontiers]. *Frontiers in psychology*, 9, 2086.
- CLIFFE, L., MANSELL, J., GREENHALGH, C. & HAZZARD, A. (2020). Materialising contexts : virtual soundscapes for real-world exploration [Publisher : Springer]. *Personal and Ubiquitous Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01405-3>
- CLIFFE, L., MANSELL, J., CORMAC, J., GREENHALGH, C. & HAZZARD, A. (2019). The Audible Artefact : Promoting Cultural Exploration and Engagement with Audio Augmented Reality, In *Proceedings of the 14th International Audio Mostly Conference : A Journey in Sound*.
- CLINI, P., FRONTONI, E., QUATTRINI, R. & PIERDICCA, R. (2014). Augmented reality experience : From high-resolution acquisition to real time augmented contents [Publisher : Hindawi Publishing Corporation]. *Advances in Multimedia*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/597476>
- COELHO, A. & COSTA, L. M. (2017). The integration of augmented reality and the concept of sticker album collection for informal learning in museums, In *International Conference on Immersive Learning*, Springer.
- CUSHING, A. & COWAN, B. (2017). Walk1916 : Exploring non-research user access to and use of digital surrogates via a mobile walking tour app [Publisher : Emerald Group Publishing Ltd.]. *Journal of Documentation*, 73(5), 917-933. <https://doi.org/10.1108/JD-03-2017-0031>
- D'AGNANO, F., BALLETTI, C., GUERRA, F. & VERNIER, P. (2020). Tooteko : A case study of augmented reality for an accessible cultural heritage. Digitization, 3D printing and sensors for an audio-tactile experience [Publisher : Copernicus Publications]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40.

- DAMALA, A., HORNECKER, E., van der VAART, M., van DIJK, D. & RUTHVEN, I. (2016). The loupe : Tangible augmented reality for learning to look at ancient Greek art [Publisher : University of AEGEAN]. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 16(5), 73-85. <https://doi.org/10.5281/zenodo.204970>
- DAMALA, A. & STOJANOVIC, N. (2012). Tailoring the Adaptive Augmented Reality (A2R) museum visit : Identifying Cultural Heritage professionals' motivations and needs, In *11th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2012 - Arts, Media, and Humanities Papers, ISMAR-AMH 2012*. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-AMH.2012.6483992>
- DAMALA, A., SCHUCHERT, T., RODRIGUEZ, I., MORAGUES, J., GILLEADE, K. & STOJANOVIC, N. (2013). Exploring the affective museum visiting experience : adaptive augmented reality (A2R) and cultural heritage. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(1), 117-142.
- D'AURIA, D., DI MAURO, D., CALANDRA, D. & CUTUGNO, F. (2014). Caruso : Interactive headphones for a dynamic 3D audio application in the cultural heritage context, In *Proceedings of the 2014 IEEE 15th International Conference on Information Reuse and Integration, IEEE IRI 2014*. <https://doi.org/10.1109/IRI.2014.7051934>
- DE PAOLIS, L., DE LUCA, V. & D'ERRICO, G. (2018). Augmented Reality to Understand the Leonardo's Machines. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10851 LNCS, 320-331. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95282-6_24
- DEBENHAM, P., THOMAS, G. & TROUT, J. (2011). Evolutionary augmented reality at the Natural History Museum, In *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2011*. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092400>
- DELA CRUZ, D., SEVILLA, J., SAN GABRIEL, J., DELA CRUZ, A. & ELLA JOYCE, S. (2018). Design and Development of Augmented Reality (AR) Mobile Application for Malolos' Kameztizuhan (Malolos Heritage Town, Philippines), In *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference, GEM 2018*. <https://doi.org/10.1109/GEM.2018.8516272>
- DIECK, M. C. t., JUNG, T. H. & DIECK, D. t. (2018). Enhancing art gallery visitors' learning experience using wearable augmented reality : generic learning out-

- comes perspective [Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/13683500.2016.1224818>].
Current Issues in Tourism, 21(17), 2014-2034. <https://doi.org/10.1080/13683500.2016.1224818>
- DIMA, M., HURCOMBE, L. & WRIGHT, M. (2014). Touching the past : Haptic augmented reality for museum artefacts. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8526 LNCS, 3-14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_1
- DUGULEANA, M., BRODI, R., GIRBACIA, F., POSTELNICU, C., MACHIDON, O. & CARROZZINO, M. (2016). Time-travelling with mobile augmented reality : A case study on the piazza dei Miracoli. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10058 LNCS, 902-912. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_73
- DUMAS, B., PIRAU, J. & LALANNE, D. (2017). Modelling fusion of modalities in multimodal interactive systems with MMMM, In *Proceedings of the 19th ACM international conference on multimodal interaction - ICMI 2017*. the 19th ACM International Conference, Glasgow, UK, ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3136755.3136768>
- DURAND, E., MERIENNE, F., ROGER, J. & PERE, C. (2012). Une implémentation de la réalité augmentée pour le patrimoine.
- FAKHOOR, M., AZOUGH, A., KAGHAT, F.-Z. & MEKNASSI, M. (2020). A Cultural Scavenger Hunt Serious Game Based on Audio Augmented Reality. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1102 AISC, 1-8. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36653-7_1
- FENU, C. & PITTARELLO, F. (2018). Svevo tour : the design and the experimentation of an augmented reality application for engaging visitors of a literary museum. *International Journal of Human-Computer Studies*, 114, 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.01.009>
- FLAVIÁN, C., IBÁÑEZ-SÁNCHEZ, S. & ORÚS, C. (2019). The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience [Publisher : Elsevier]. *Journal of Business Research*, 100, 547-560.
- FLYNN, B. (2013). V-Embodiment for cultural heritage, In *Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd*

- UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions fromCAA, Arqueologica 2.0 et al.* <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743759>
- FONI, A. E., PAPAGIANNAKIS, G. & MAGNENAT-THALMANN, N. (2010). A taxonomy of visualization strategies for cultural heritage applications [Publisher : ACM New York, NY, USA]. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 3(1), 1-21.
- FRANZ, J., ALNUSAYRI, M., MALLOCH, J., GAHLON, A. & REILLY, D. (2019, mai 2). AR in the Gallery : The Psychogeographer's Table, In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3290607.3312898>
- FRANZ, J., REILLY, D. & MALLOCH, J. (2019). Shared AR experiences in a museum installation, 5.
- FULLER, U., JOHNSON, C. G., AHONIEMI, T., CUKIERMAN, D., HERNÁN-LOSADA, I., JACKOVA, J., LAHTINEN, E., LEWIS, T. L., THOMPSON, D. M. & RIEDESEL, C. (2007). Developing a computer science-specific learning taxonomy [Publisher : ACM New York, NY, USA]. *ACM SIGCSE Bulletin*, 39(4), 152-170.
- FUSTÉ-FORNÉ, F. (2020). Mapping heritage digitally for tourism : an example of Vall de Boí, Catalonia, Spain [Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1700264>]. *Journal of Heritage Tourism*, 15(5), 580-590. <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1700264>
- GARDONI, F., MOJETTA, F., SORRENTINO, C., ETZI, R., GALLACE, A., BORDEGONI, M. & CARULLI, M. (2020). Raising awareness about the consequences of human activities on natural environments through multisensory augmented reality : Amazon rainforest and coral reef interactive experiences [Publisher : CAD Solutions, LLC]. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(4), 815-830. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.815-830>
- GAROFALO, V. (2019). Digital technologies for the fruition of archaeological heritage. The visualisation of the temple C metopes polychrome in selinunte. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 919, 671-680. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_69
- GAROZZO, R., PASQUALINO, G., ALLEGRA, D., SANTAGATI, C. & STANCO, F. (2019). Augmented Reality for the Valorization and Communication of Ruined Archi-

- ecture. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11808 LNCS, 170-178. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30754-7_17
- GERMAN, R., HERVY, B., ROIRAND, V. & MAZEDIA, F. (2018). Spatial Augmented Reality for Collective and Immersive Experiences In Museums.
- GIMENO, J., OLANDA, R., MARTINEZ, B. & SANCHEZ, F. (2011). Multiuser augmented reality system for indoor exhibitions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6949 LNCS, 576-579. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23768-3_86
- GIMENO, J., PORTALÉS, C., COMA, I., FERNÁNDEZ, M. & MARTÍNEZ, B. (2017). Combining traditional and indirect augmented reality for indoor crowded environments. a case study on the casa batlló museum. *Computers & Graphics*, 69, 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.09.001>
- GLASS, R. L. & VESSEY, I. (1995). Contemporary application-domain taxonomies [Publisher : IEEE]. *IEEE Software*, 12(4), 63-76.
- GONZÁLEZ VARGAS, J. C., FABREGAT, R., CARRILLO-RAMOS, A. & JOVÉ, T. (2020). Survey : Using Augmented Reality to Improve Learning Motivation in Cultural Heritage Studies [Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Applied Sciences*, 10(3), 897.
- GRAMMENOS, D., MICHEL, D., ZABULIS, X. & ARGYROS, A. (2011). PaperView : Augmenting physical surfaces with location-aware digital information, In *Proceedings of the 5th International Conference on Tangible Embedded and Embodied Interaction, TEI'11*. <https://doi.org/10.1145/1935701.1935713>
- GRECI, L. (2016). An augmented reality guide for religious museum. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9769, 280-289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40651-0_23
- GUEDES, L. S., MARQUES, L. A. & VITÓRIO, G. (2020). Enhancing Interaction and Accessibility in Museums and Exhibitions with Augmented Reality and Screen Readers, In *International Conference on Computers Helping People with Special Needs*, Springer.

- GÜLEÇ ÖZER, D., NAGAKURA, T. & VLAVIANOS, N. (2016). Augmented reality (AR) of historic environments : Representation of parion theater, Biga, Turkey [Publisher : Istanbul Teknik Universitesi, Faculty of Architecture]. *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 13(2), 185-193. <https://doi.org/10.5505/itujfa.2016.66376>
- GUTIERREZ, J. M., MOLINERO, M. A., SOTO-MARTÍN, O. & MEDINA, C. R. (2015). Augmented Reality Technology Spreads Information about Historical Graffiti in Temple of Debod. *Procedia Computer Science*, 75, 390-397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.262>
- HAMMADY, R., MA, M., STRATHERN, C. & MOHAMAD, M. (2020). Design and development of a spatial mixed reality touring guide to the egyptian museum. *Multimedia Tools and Applications*, 79(5), 3465-3494. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08026-w>
- HAN, D.-I. D., DIECK, M. C. T. & JUNG, T. (2019). Augmented Reality Smart Glasses (ARSG) visitor adoption in cultural tourism [Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/02614367.2019.1604790>]. *Leisure Studies*, 38(5), 618-633. <https://doi.org/10.1080/02614367.2019.1604790>
- HARRINGTON, M. C. R., TATZGERN, M., LANGER, T. & WENZEL, J. W. (2019). Augmented reality brings the real world into natural history dioramas with data visualizations and bioacoustics at the carnegie museum of natural history [_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cura.12308>]. *Curator : The Museum Journal*, 62(2), 177-193. <https://doi.org/10.1111/cura.12308>
- HAYDAR, M., ROUSSEL, D., MAÏDI, M., OTMANE, S. & MALLEM, M. (2011). Virtual and augmented reality for cultural computing and heritage : a case study of virtual exploration of underwater archaeological sites (preprint) [Publisher : Springer]. *Virtual reality*, 15(4), 311-327.
- HE, Z., WU, L. & LI, X. R. (2018). When art meets tech : The role of augmented reality in enhancing museum experiences and purchase intentions [Publisher : Elsevier]. *Tourism Management*, 68, 127-139.
- HOOKE, J., BRIGGS, J., BLYTHE, M., WALSH, N. & OLIVIER, P. (2013). Repentir : Digital Exploration Beneath the Surface of an Oil Painting, In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/2468356.2479581>

- HUANG, C.-Y., WANG, L.-H., HSU, W.-L., CHANG, K.-P., LIN, F.-R., CHEN, H.-Y., CHEN, K.-T. & HO, J.-C. (2019). A Design of Augmented-Reality Smart Window Using Directive Information Fusion Technology for Exhibitions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11567 LNCS, 447-457. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22643-5_35
- HUGUES, O., FUCHS, P. & NANNIPIERI, O. (2011, juillet 13). New Augmented Reality Taxonomy : Technologies and Features of Augmented Environment. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_2
- HURST, W., GERAERTS, R. & ZHAO, Y. (2019). Crowdar table-an ar table for interactive crowd simulation, In *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR 2019*. <https://doi.org/10.1109/AIVR46125.2019.00070>
- JAKOBSEN, C., LARSEN, J., NØRLEM, M. & KRAUS, M. (2017). Reviving aggersborg - Conveying lost heritage sites through indirect augmented reality, In *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3110292.3110299>
- JAMIL, M. (2019). Augmented reality for historic storytelling and preserving artifacts in Pakistan. *IJASOS- International E-journal of Advances in Social Sciences*, 998-1004. <https://doi.org/10.18769/ijasos.592732>
- JEVREMOVIC, V. & PETROVSKI, S. (2012). MUZZEUM—Augmented Reality and QR codes enabled mobile platform with digital library, used to Guerrilla open the National Museum of Serbia, In *2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, IEEE.
- JIN, Y., MA, M. & LI, J. (2020). Immersive Storytelling in Augmented Reality : Witnessing the Kindertransport. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12434 LNCS, 17-33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61814-8_2
- JIN, Y., MA, M. & LIU, Y. (2020). Interactive Narrative in Augmented Reality : An Extended Reality of the Holocaust, In *International Conference on Human-Computer Interaction*, Springer.
- KAGHAT, F. Z., AZOUGH, A., FAKHOUR, M. & MEKNASSI, M. (2020). A new audio augmented reality interaction and adaptation model for museum visits. *Com-*

- puters & Electrical Engineering*, 84, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106606>
- KAGHAT, F. & CUBAUD, P. (2010). Fluid interaction in audio-guided museum visit : Authoring tool and visitor device, In *VAST 2010 - 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.2312/VAST/VAST10/163-170>
- KAKAROUNTAS, A., DRAGOUMANOS, S. & KAKAROUNTAS, K. (2014). Extending visitor's reality at museums, In *IISA 2014 - 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*. <https://doi.org/10.1109/IISA.2014.6878813>
- KALAWSKY, R. S. (2000). The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments, In *3rd International Workshop on Presence*.
- KANG, J. (2013). AR teleport : Digital reconstruction of historical and cultural-heritage sites for mobile phones via movement-based interactions. *Wireless Personal Communications*, 70(4), 1443-1462. <https://doi.org/10.1007/s11277-012-0758-4>
- KASAPAKIS, V., GAVALAS, D. & GALATIS, P. (2016). Augmented reality in cultural heritage : Field of view awareness in an archaeological site mobile guide [Publisher : IOS Press]. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 8(5), 501-514. <https://doi.org/10.3233/AIS-160394>
- KEIL, J., PUJOL, L., ROUSSOU, M., ENGELKE, T., SCHMITT, M., BOCKHOLT, U. & ELEFATHERATOU, S. (2013). A digital look at physical museum exhibits : Designing personalized stories with handheld Augmented Reality in museums, In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, IEEE.
- KELLY, A., WHITLOCK, M., NICKOLOFF, B., LAM, A., SZAFIR, D. A. & VOIDA, S. (2017). Becoming butterflies : interactive embodiment of the butterfly lifecycle, In *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ACM.
- KENDERDINE, S., CHAN, L. & SHAW, J. (2014). Pure land : Futures for embodied museography [Publisher : Association for Computing Machinery]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 7(2). <https://doi.org/10.1145/2614567>

- KHAN, M. (2014). MUSE : Understanding traditional dances, In *Proceedings - IEEE Virtual Reality*. <https://doi.org/10.1109/VR.2014.6802107>
- KHAN, M. A., ISRAR, S., ALMOGREN, A. S., DIN, I. U., ALMOGREN, A. & RODRIGUES, J. J. (2020). Using augmented reality and deep learning to enhance Taxila Museum experience [Publisher : Springer]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 1-12.
- KIM, S., SANCHEZ, A., HANIFZAI, J., PALISPIS, F. & NISHIMURA, K. (2019). The OTC (Object to Camera) Approach to Visualize Behind Stories of Museum Exhibits. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11786 LNCS, 243-252. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30033-3_19
- KIM, T., JANG, J., PARK, J. & PARK, J. (2013). The journey of a White Rhinoceros : Sculpture augmentation for gallery exhibition, In *2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Arts, Media, and Humanities, ISMAR-AMH 2013*. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-AMH.2013.6671265>
- KLJUN, M., PUCIHAR, K. Č. & COULTON, P. (2018). User engagement continuum : art engagement and exploration with augmented reality, In *Augmented reality art*. Springer.
- KOLIVAND, H., EL RHALIBI, A., SHAHRIZAL SUNAR, M. & SABA, T. (2018). ReVitAge : realistic virtual heritage taking shadows and sky illumination into account. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.01.020>
- KOLSTEE, Y. & VAN ECK, W. (2011). The augmented Van Gogh's : Augmented reality experiences for museum visitors, In *2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Arts, Media, and Humanities, ISMAR-AMH 2011*. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-AMH.2011.6093656>
- KOO, S., KIM, J., KIM, C., KIM, J. & CHA, H. (2019). Development of an augmented reality tour guide for a cultural heritage site [Publisher : Association for Computing Machinery]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 12(4). <https://doi.org/10.1145/3317552>
- KORTBEK, K. J. & GRØNBÆK, K. (2008, octobre 20). Communicating art through interactive technology : new approaches for interaction design in art museums, In *Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction :*

- building bridges*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1463160.1463185>
- KOSMOPOULOS, D. & STYLARAS, G. (2018). A survey on developing personalized content services in museums. *Pervasive and Mobile Computing*, 47, 54-77.
- KRATKY, A. (2015). Transparent touch – interacting with a multi-layered touch-sensitive display system. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9176, 114-126. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20681-3_11
- KRZYWINSKA, T., PHILLIPS, T., PARKER, A. & SCOTT, M. (2020). From immersion's bleeding edge to the augmented telegrapher : a method for creating mixed reality games for museum and heritage contexts [ISBN : 9781450399999 Place : New York, USA Publisher : Association for Computing Machinery]. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 13. <https://doi.org/10.1145/1122445.1122456>
- KVĚTINA, P., UNGER, J. & VAVREČKA, P. (2015). Presenting the invisible and unfathomable : Virtual museum and augmented reality of the Neolithic site in Bylany, Czech Republic. *Archeologické rozhledy*, 67(1).
- KYRIAKOU, P. & HERMON, S. (2019). Can i touch this? using natural interaction in a museum augmented reality system. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 12, e00088. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00088>
- LEACH, M., MADDOCK, S., HADLEY, D., BUTTERWORTH, C., MORELAND, J., DEAN, G., MACKINDER, R., PACH, K., BAX, N., MCKONE, M. & FLEETWOOD, D. (2018). Re-creating sheffield's medieval castle in situ using outdoor augmented reality. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11162 LNCS, 213-229. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01790-3_13
- LEE, Y., CHOI, J., KIM, Y., LEE, J., SON, M., AHMED, B. & LEE, K. (2015). Rise : Reflectance transformation imaging in spatial augmented reality for exhibition of cultural heritage, In *ACM SIGGRAPH 2015 Posters, SIGGRAPH 2015*. <https://doi.org/10.1145/2787626.2792626>
- LEE, Y., LEE, J., AHMED, B., SON, M. & LEE, K. (2019). A new projection-based exhibition system for a museum [Publisher : Association for Computing Machinery].

- nerly]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 12(2). <https://doi.org/10.1145/3275522>
- LEOPARDI, A., CECCACCI, S. & MENGONI, M. (2020). Dynamic Projection for the Design of an Adaptive Museum Guide. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 85-94. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31154-4_8
- LI, X., XIE, M. & CHU, J. (2019). Exploring the Application of Serious Game Based on Augmented Reality : A Case Study on Tsingtao Beer Museum, In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, IOP Publishing.
- LIAROKAPIS, F., PETRIDIS, P., ANDREWS, D. & de FREITAS, S. (2017). Multimodal serious games technologies for cultural heritage (M. IOANNIDES, N. MAGNENAT-THALMANN & G. PAPAGIANNAKIS, Éd.). In M. IOANNIDES, N. MAGNENAT-THALMANN & G. PAPAGIANNAKIS (Éd.), *Mixed reality and gamification for cultural heritage*. Cham, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49607-8_15
- LIN, C. M., HUANG, C. Y., YANG, D. Y., LIN, T. C., CHUNG, C. C. & LIN, J. H. (2013). An android-based interactive museum exhibit system using wireless sensing and augmented reality technologies, In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ.
- LIN, T.-G., SHIH, H.-L., LEE, C.-T., HSIEH, H.-Y., CHEN, Y.-Y. & LIU, C.-K. (2019). Omni-learning XR technologies and visitor-centered experience in the smart art museum, In *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR 2018*. <https://doi.org/10.1109/AIVR.2018.00061>
- LIN, W., LO, W.-T. & YUEH, H.-P. (2019, mars). How the Multimodal Media in Augmented Reality Affects Museum Learning Experience, In *2019 12th Asia Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality (APMAR)*. 2019 12th Asia Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality (APMAR), Ikoma, Nara, Japan, IEEE. <https://doi.org/10.1109/APMAR.2019.8709286>
- LINDEMAN, R. W. & NOMA, H. (2007). A classification scheme for multi-sensory augmented reality, In *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology*.

- LITVAK, E. & KUFLIK, T. (2020). Enhancing cultural heritage outdoor experience with augmented-reality smart glasses [Publisher : Springer]. *Personal and Ubiquitous Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01366-7>
- LU, W., NGUYEN, L.-C., CHUAH, T. L. & DO, E. Y.-L. (2014). Effects of mobile AR-enabled interactions on retention and transfer for learning in art museum contexts, In *2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality-Media, Art, Social Science, Humanities and Design (ISMAR-MASH'D)*, IEEE.
- LUKOSCH, S., BILLINGHURST, M., ALEM, L. & KIYOKAWA, K. (2015). Collaboration in augmented reality [Publisher : Springer]. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 24(6), 515-525.
- MACKAY, W. E. (1998). Augmented reality : linking real and virtual worlds : a new paradigm for interacting with computers, In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*.
- MADSEN, J. & MADSEN, C. (2015). Handheld visual representation of a castle chapel ruin [Publisher : Association for Computing Machinery]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 9(1). <https://doi.org/10.1145/2822899>
- MANIELLO, D. (2019). Augmented cityscape : The GLOWfestival case as valuator of the territory cultural heritage. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 919, 374-383. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_40
- MANN, L. & FRYAZINOV, O. (2019). 3D printing for mixed reality hands-on museum exhibit interaction, In *ACM SIGGRAPH 2019 Posters, SIGGRAPH 2019*. <https://doi.org/10.1145/3306214.3338609>
- MARTÍNEZ, B., CASAS, S., VIDAL-GONZÁLEZ, M., VERA, L. & GARCÍA-PEREIRA, I. (2018). TinajAR : an edutainment augmented reality mirror for the dissemination and reinterpretation of cultural heritage [Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 33.
- MARTO, A. & GONÇALVES, A. (2019). Mobile AR : User evaluation in a cultural heritage context [Publisher : MDPI AG]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(24). <https://doi.org/10.3390/app9245454>
- MARTO, A., MELO, M., GONÇALVES, A. & BESSA, M. (2020). Multisensory Augmented Reality in Cultural Heritage : Impact of Different Stimuli on Presence, En-

- joyment, Knowledge and Value of the Experience [Publisher : IEEE]. *IEEE Access*, 8, 193744-193756.
- MASON, M. (2016). The MIT museum glassware prototype : visitor experience exploration for designing smart glasses. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 9(3), 12.
- MATUK, C. (2016). The learning affordances of augmented reality for museum exhibits on human health [Publisher : Taylor & Francis]. *Museums & Social Issues*, 11(1), 73-87.
- MAURIZIO, C., LIVIA, L., LUDOVICA, R. & LUCILLA, F. (2017). The app STAR : An important instrument for creating the first spreading thematic museum on the archaeoastronomy in Rome, In *Astrophysics and Space Science Proceedings*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54487-8_15
- MERIEEM, K., MAKRAM, M. & FARAH, I. R. (2018). Virtual and Augmented Reality in the Valuation of the Tunisian Cultural Heritage : Application to Thysdrus (ElJem) Amphitheater, In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, IEEE.
- MILGRAM, P. & COLQUHOUN, H. (1999). A taxonomy of real and virtual world display integration [Publisher : Ohmsha Ltd. and Springer]. *Mixed reality : Merging real and virtual worlds*, 1(1999), 1-26.
- MILGRAM, P. & KISHINO, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays [Publisher : The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers]. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321-1329.
- MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A. & KISHINO, F. (1995). Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum, In *Telem manipulator and telepresence technologies*, International Society for Optics ; Photonics.
- MISHRA, S. & CAFARO, F. (2018). Full Body Interaction beyond Fun : Engaging Museum Visitors in Human-Data Interaction, In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*.
- MIYATA, K., SHIROISHI, R. & INOUE, Y. (2011). Applying AR technology with a projector-camera system in a history museum, In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. <https://doi.org/10.1117/12.872179>

- MOHAMMED-AMIN, R., LEVY, R. & BOYD, J. (2012). Mobile augmented reality for interpretation of archaeological sites, In *PATCH 2012 - Proceedings of the 2012 ACM Workshop on Personalized Access to Cultural Heritage, Co-located with ACM Multimedia 2012*. <https://doi.org/10.1145/2390867.2390871>
- MOHRING, M., LESSIG, C. & BIMBER, O. (2004, novembre 2). Video See-Through AR on Consumer Cell-Phones, In *Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, USA, IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2004.63>
- MORGANTI, C. & BARTOLOMEI, C. (2018). Habanapp : Havana's architectural Heritage a click away [Issue : 2], In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Issue : 2. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-723-2018>
- MOTEJLEK, J. & ALPAY, E. (2019). A taxonomy for virtual and augmented reality in education. *arXiv preprint arXiv :1906.12051*.
- NARCISO, D., PÁDUA, L., ADÃO, T., PERES, E. & MAGALHÃES, L. (2015). MixAR Mobile Prototype : Visualizing Virtually Reconstructed Ancient Structures In Situ. *Procedia Computer Science*, 64, 852-861. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.638>
- NICKERSON, R. C., VARSHNEY, U. & MUNTERMANN, J. (2013). A method for taxonomy development and its application in information systems [Publisher : Taylor & Francis]. *European Journal of Information Systems*, 22(3), 336-359.
- NOFAL, E., ELHANAFI, A., HAMEEUW, H. & VANDE MOERE, A. (2018). Architectural contextualization of heritage museum artifacts using augmented reality [Publisher : Indiana University]. *Studies in Digital Heritage*, 2(1), 42-67. <https://doi.org/10.14434/sdh.v2i1.24500>
- NOREIKIS, M., SAVELA, N., KAAKINEN, M., XIAO, Y. & OKSANEN, A. (2019). Effects of Gamified Augmented Reality in Public Spaces. *IEEE Access*, 7, 148108-148118. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2945819>
- NORMAND, J.-M., SERVIÈRES, M. & MOREAU, G. (2012). A new typology of augmented reality applications, In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, ACM.
- OHASHI, I., NUMATA, T., YATA, H., YOSHIDA, S., NARUMI, T., TANIKAWA, T. & HIROSE, M. (2019). Demonstration Experiment of AR Exhibition System Inducing User

Behavior with Visual Incompatibility. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11570 LNCS, 174-186. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22649-7_15

- OHLEI, A., BOUCK-STANDEN, D., WINKLER, T. & HERCZEG, M. (2018). Infogrid : acceptance and usability of augmented reality for mobiles in real museum contexts [Publisher : Gesellschaft für Informatik eV]. *Mensch und Computer 2018-Workshopband*.
- OLANIYAN, R., HARVEY, T., HENDRIXSON, H. & PALILONIS, J. (2020). Did You Say Buttonless ? Exploring Alternative Modes of Sensory Engagement for Augmented Reality Storytelling Experiences, In *International Conference on Human-Computer Interaction*, Springer.
- OLEKSY, T. & WNUK, A. (2016). Augmented places : An impact of embodied historical experience on attitudes towards places. *Computers in Human Behavior*, 57, 11-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.12.014>
- OSAWA, S., TANAKA, R., NARUMI, T., TANIKAWA, T. & HIROSE, M. (2016). Crowd-cloud window to the past : Constructing a photo database for on-site AR exhibitions by crowdsourcing. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9735, 313-324. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40397-7_30
- OVIATT, S. (1997). Multimodal interactive maps : designing for human performance. *Human-Computer Interaction*, 12(1), 93-129. https://doi.org/10.1207/s15327051hci1201%262_4
- OVIATT, S. (1999). Ten myths of multimodal interaction. *Communications of the ACM*, 42(11), 74-81. <https://doi.org/10.1145/319382.319398>
- OZDEN, K., UNAY, D., INAN, H., KABA, B. & ERGUN, O. (2014). Intelligent interactive applications for museum visits [Publisher : Springer Verlag]. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8740, 555-563. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0>
- PALIOKAS, I., PATENIDIS, A. T., MITSOPOULOU, E. E., TSITA, C., PEHLIVANIDES, G., KARYATI, E., TSAFARAS, S., STATHOPOULOS, E. A., KOKKALAS, A. & DIPLARIS, S. (2020). A Gamified Augmented Reality Application for Digital Heritage and Tourism

- [Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Applied Sciences*, 10(21), 7868.
- PANOY, C., RAGIA, L., DIMELLI, D. & MANIA, K. (2018). An architecture for mobile outdoors augmented reality for cultural heritage [Publisher : MDPI AG]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/ijgi7120463>
- PARK, M. K., LIM, K. J., SEO, M. K., JUNG, S. J. & LEE, K. H. (2015). Spatial augmented reality for product appearance design evaluation [Publisher : Oxford University Press]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(1), 38-46.
- PEDERSEN, I., GALE, N., MIRZA-BABAEI, P. & REID, S. (2017). More than meets the eye : The benefits of augmented reality and holographic displays for digital cultural heritage [Publisher : ACM New York, NY, USA]. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 10(2), 1-15.
- PERRA, C., GRIGORIOU, E., LIOTTA, A., SONG, W., USAI, C. & GIUSTO, D. (2019). Augmented reality for cultural heritage education, In *IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin, ICCE-Berlin*. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Berlin47944.2019.8966211>
- PETRELLI, D. (2019). Making virtual reconstructions part of the visit : An exploratory study. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15, e00123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00123>
- PETRUCCO, C. & AGOSTINI, D. (2016). Teaching our cultural heritage using mobile augmented reality [Publisher : Italian e-Learning Association]. *Journal of E-Learning and Knowledge Society*, 12(3), 115-128. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84981306326&partnerID=40&md5=f1f31cecb9a82784e6cafe72385d5dd>
- PIEKARSKI, W. & THOMAS, B. (2002). ARQuake : the outdoor augmented reality gaming system [Publisher : ACM New York, NY, USA]. *Communications of the ACM*, 45(1), 36-38.
- PIERDICCA, R., FRONTONI, E., ZINGARETTI, P., MALINVERNI, E., GALLI, A., MARCHEGGIANI, E. & COSTA, C. (2016). Cyberarchaeology : Improved way findings for archaeological parks through mobile augmented reality. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and*

Lecture Notes in Bioinformatics), 9769, 172-185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40651-0_14

- PIERDICCA, R., FRONTONI, E., ZINGARETTI, P., STURARI, M., CLINI, P. & QUATTRINI, R. (2015). Advanced interaction with paintings by augmented reality and high resolution visualization : A real case exhibition. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9254, 38-50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22888-4_4
- PIKOV, N., RUMYANTSEV, M., VISHNIAKOVA, M., KIZHNER, I. & HOOKK, D. (2015). Touching an ancient stone : 3d modeling and augmented reality techniques for a collection of petroglyphs from State Hermitage Museum, In *2015 Digital Heritage*, IEEE.
- POCE, A., AMENDUNI, F., DE MEDIO, C., VALENTE, M. & RE, M. R. (2019). Adopting Augmented Reality to Engage Higher Education Students in a Museum University Collection : the Experience at Roma Tre University [Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Information*, 10(12), 373.
- POLLALIS, C., FAHNBULLEH, W., TYNES, J. & SHAER, O. (2017). HoloMuse : enhancing engagement with archaeological artifacts through gesture-based interaction with holograms, In *Proceedings of the tenth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction - TEI '17*, Yokohama, Japan, ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3024969.3025094>
- POLLALIS, C., GILVIN, A., WESTENDORF, L., FUTAMI, L., VIRGILIO, B., HSIAO, D. & SHAER, O. (2018, mai 30). ARtLens : Enhancing Museum Visitors' Engagement with African Art, In *Proceedings of the 2018 ACM Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3197391.3205435>
- PUCIHAR, K. Č. & KLJUN, M. (2018). ART for art : augmented reality taxonomy for art and cultural heritage, In *Augmented reality art*. Springer.
- PURNOMO, F., SANTOSA, P., HARTANTO, R., PRATISTO, E. & PURBAYU, A. (2018). Implementation of Augmented Reality Technology in Sangiran Museum with Vuforia [Issue : 1], In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. Issue : 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012103>

- PUSPASARI, S., SUHANDI, N. & IMAN, J. (2019). Enhancing the Visitors Learning Experience in SMB II Museum Using Augmented Reality Technology, In *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. <https://doi.org/10.1109/ICEEI47359.2019.8988831>
- RAMIREZ, M., RAMOS, E., CRUZ, O., HERNANDEZ, J., PEREZ-CORDOBA, E. & GARCIA, M. (2013). Design of interactive museographic exhibits using Augmented reality, In *23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing, CONIELECOMP 2013*. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2013.6525747>
- RECUPERO, A., TALAMO, A., TRIBERTI, S. & MODESTI, C. (2019). Bridging Museum Mission to Visitors' Experience : Activity, Meanings, Interactions, Technology. *Frontiers in Psychology*, 10, 2092. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02092>
- REICHINGER, A., FUHRMANN, A., MAIERHOFER, S. & PURGATHOFER, W. (2016, octobre 23). Gesture-Based Interactive Audio Guide on Tactile Reliefs, In *Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2982142.2982176>
- REKIMOTO, J. & NAGAO, K. (1995). The world through the computer : Computer augmented interaction with real world environments, In *Proceedings of the 8th annual ACM symposium on User interface and software technology*.
- RENEVIER, P. & NIGAY, L. (2001). Mobile collaborative augmented reality : the augmented stroll, In *IFIP International Conference on Engineering for Human-Computer Interaction*, Springer.
- RIDEL, B., REUTER, P., LAVIOLE, J., MELLADO, N., COUTURE, N. & GRANIER, X. (2014). The revealing flashlight : Interactive spatial augmented reality for detail exploration of cultural heritage artifacts [Publisher : Association for Computing Machinery]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 7(2). <https://doi.org/10.1145/2611376>
- RODRIGO, M. M. T., VIDAL, E. C. E., HERRAS, I. Y. D., AGAPITO, J. L., DIY, W. D., ORTEGA, V. A., BUGAYONG, N. A., ONG, A., SANTOS, J. M. & LIM, L. R. T. (2019). Tuklas : Design, Development and Testing of an Augmented Reality Experience for a Children's Museum, In *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Education (TALE)*, IEEE.

- RODRIGUES, J., RAMOS, C., PEREIRA, J., SARDO, J. & CARDOSO, P. (2019). Mobile Five Senses Augmented Reality System : Technology Acceptance Study [Publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.]. *IEEE Access*, 7, 163022-163033. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953003>
- ROEDERER, C., REVAT, R. & PALLUD, J. (2020). Does Digital Mediation Really Change the Museum Experience ? Museomix in the Lyon-Fourvière Archaeological Museum [Publisher : Management International]. *International Journal of Arts Management*, 22(3), 108-123.
- ROLDAN, J., LARA-OSUNA, R. & GONZALEZ-TORRE, A. (2019). The Project 'Art for Learning Art' in Contemporary Art Museums [Publisher : Blackwell Publishing Ltd]. *International Journal of Art and Design Education*, 38(3), 572-582. <https://doi.org/10.1111/jade.12245>
- RÖLTGEN, D. & DUMITRESCU, R. (2020). Classification of industrial Augmented Reality use cases [Publisher : Elsevier]. *Procedia CIRP*, 91, 93-100.
- ROSA, N., WERKHOVEN, P. & HÜRST, W. (2016). (Re-) examination of multimodal augmented reality, In *Proceedings of the 2016 workshop on Multimodal Virtual and Augmented Reality*.
- RYFFEL, M., ZÜND, F., AKSOY, Y., MARRA, A., NITTI, M., AYDIN, T. & SUMNER, B. (2017). AR museum : A mobile augmented reality application for interactive painting recoloring, In *Proceedings of the International Conference on Interfaces and Human Computer Interaction 2017 - Part of the Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2017*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85040167291&partnerID=40&md5=01324a446b28719ada5f7472fa38b2ff>
- SAUTER, L., ROSSETTO, L. & SCHULDT, H. (2019). Exploring cultural heritage in augmented reality with gofind!, In *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR 2018*. <https://doi.org/10.1109/AIVR.2018.00041>
- SEE, Z., SUNAR, M., BILLINGHURST, M., DEY, A., SANTANO, D., ESMAEILI, H. & THWAITES, H. (2017). An augmented reality and virtual reality pillar for exhibitions : A subjective exploration, In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments, ICAT-EGVE 2017*. <https://doi.org/10.2312/egve.20171342>

- SHAKOURI, F. & TIAN, F. (2019). Avebury Portal – A Location-Based Augmented Reality Treasure Hunt for Archaeological Sites. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11462 LNCS, 39-49. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23712-7_7
- SHEEHY, K., GARCIA CARRIZOSA, H., RIX, J., SEALE, J. & HAYHOE, S. (2019). Inclusive museums and augmented reality. Affordances, participation, ethics and fun. *The International Journal of the Inclusive Museum*, In-Press.
- SIERRA, A., RIU-BARRERA, E., TARRIDA, E. & PLUMA, J. (2015). Taull1123 : Immersive experience in a World Heritage Site (or augmented reality without devices). *MW2015 : Museums and the Web*.
- SIKORA, M., RUSSO, M., DJEREK, J. & JURČEVIĆ, A. (2018). Soundscape of an archaeological site recreated with audio augmented reality [Publisher : ACM New York, NY, USA]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 14(3), 1-22.
- ŠIMER, E., KLJUN, M. & ČOPIĆ PUCIHAR, K. (2016). I was here : a system for creating augmented reality digital graffiti in public place.
- SIMONETTOA, E., FROMENT, C., LABERGERIE, E., FERRÉ, G., SÉCHET, B., CHÉDORGE, H., CALI, J. & POLIDORI, L. (2013). Valorisation of Cultural Heritage Through Virtual Visit and Augmented Reality : The Case of the Abbey of Epau (France). *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 289-294.
- SLATER, M. & WILBUR, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments [Publisher : MIT Press]. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603-616.
- SPRUNG, G. & HAXHA, A. (2020). IFAR : MobileAR for cultural heritage, In *CEUR Workshop Proceedings*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087810819&partnerID=40&md5=659d7ea37a4f560a16db6dec64b1a9bf>
- STANCO, F., TANASI, D., GALLO, G., BUFFA, M. & BASILE, B. (2012). Augmented perception of the past - The case of Hellenistic Syracuse. *Journal of Multimedia*, 7(2), 211-216. <https://doi.org/10.4304/jmm.7.2.211-216>

- STANCO, F., TANASI, D., ALLEGRA, D., MILOTTA, F. L. M., LAMAGNA, G. & MONTEROSSO, G. (2017). Virtual anastylosis of Greek sculpture as museum policy for public outreach and cognitive accessibility [Publisher : International Society for Optics and Photonics]. *Journal of Electronic Imaging*, 26(1), 011025.
- SUGIURA, A., KITAMA, T., TOYOURA, M. & MAO, X. (2019). The Use of Augmented Reality Technology in Medical Specimen Museum Tours. *Anatomical sciences education*, 12(5), 561-571.
- SULAIMAN, S., AZIZ, N., ADZMI, S., IHSAN, N., JAIDI, N., YAZIZ, A., ROSLI, M., BAKAR, H. & MISROOM, M. (2019). Museum informatics : A case study on augmented reality at tanjung balau fishermen museum, In *2019 IEEE 9th International Conference on System Engineering and Technology, ICSET 2019 - Proceeding*. <https://doi.org/10.1109/ICSEngT.2019.8906341>
- SUPRIYONO, H., HANANI, M. & YAHYA, A. (2020). Android mobile augmented reality application for 3d visualization of museum collectibles in Surakarta. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4293-4300. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/40882020>
- SUTHERLAND, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display, In *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*.
- THEODORAKOPOULOS, M., PAPAGEORGOPOULOS, N., MOURTI, A., ANTONIOU, A., WALLACE, M., LEPOURAS, G., VASSILAKIS, C. & PLATIS, N. (2017). Personalized augmented reality experiences in museums using Google Cardboards, In *Proceedings - 12th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization, SMAP 2017*. <https://doi.org/10.1109/SMAP.2017.8022676>
- THOMAS, B., CLOSE, B., DONOGHUE, J., SQUIRES, J., DE BONDI, P., MORRIS, M. & PIEKARSKI, W. (2000). ARQuake : An outdoor/indoor augmented reality first person application, In *Digest of Papers. Fourth International Symposium on Wearable Computers*, IEEE.
- TILLON, A. B., MARCHAL, I. & HOULIER, P. (2011). Mobile augmented reality in the museum : Can a lace-like technology take you closer to works of art ?, In *2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality-Arts, Media, and Humanities*, IEEE.
- TORRES-RUIZ, M., MATA, F., ZAGAL, R., GUZMÁN, G., QUINTERO, R. & MORENO-IBARRA, M. (2020). A recommender system to generate museum itineraries applying

- augmented reality and social-sensor mining techniques. *Virtual Reality*, 24(1), 175-189. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0366-z>
- TURK, M. (2014). Multimodal interaction : a review. *Pattern Recognition Letters*, 36, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2013.07.003>
- UNESCO. (p. d.). *Définition du patrimoine culturel | Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture*. Récupérée 12 novembre 2020, à partir de <http://www.unesco.org/new/fr/culture/themes/illicit-trafficking-of-cultural-property/unesco-database-of-national-cultural-heritage-laws/frequently-asked-questions/definition-of-the-cultural-heritage/>
- VAN DER VAART, M. & DAMALA, A. (2015). Through the Loupe : Visitor engagement with a primarily text-based handheld AR application, In *2015 Digital Heritage*, IEEE.
- VANONI, D., SERACINI, M. & KUESTER, F. (2012). ARtifact : Tablet-based augmented reality for interactive analysis of cultural artifacts, In *Proceedings - 2012 IEEE International Symposium on Multimedia, ISM 2012*. <https://doi.org/10.1109/ISM.2012.17>
- VAZ, R., FERNANDES, P. O. & VEIGA, A. C. R. (2018). Designing an interactive exhibitor for assisting blind and visually impaired visitors in tactile exploration of original museum pieces [Publisher : Elsevier]. *Procedia computer science*, 138, 561-570.
- VAZ, R., FREITAS, D. & COELHO, A. (2020). Blind and Visually Impaired Visitors' Experiences in Museums : Increasing Accessibility through Assistive Technologies. *International Journal of the Inclusive Museum*, 13(2).
- VAZQUEZ-ALVAREZ, Y., AYLETT, M., BREWSTER, S., VON JUNGENSELD, R. & VIROLAINEN, A. (2016). Designing interactions with multilevel auditory displays in mobile audio-augmented reality [Publisher : Association for Computing Machinery]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 23(1). <https://doi.org/10.1145/2829944>
- VERYKOKOU, S., IOANNIDIS, C. & KONTOGIANNI, G. (2014). 3D visualization via augmented reality : The case of the middle stoa in the ancient agora of Athens [Publisher : Springer Verlag]. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8740, 279-289. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0>

- WANG, C.-S. (2019). An AR mobile navigation system integrating indoor positioning and content recommendation services [Publisher : Springer New York LLC]. *World Wide Web*, 22(3), 1241-1262. <https://doi.org/10.1007/s11280-018-0580-3>
- WANG, C.-S., CHEN, C.-L. & CHEN, S.-H. (2018). An augmented reality mobile navigation system integrating indoor localization and recommendation mechanism. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 422, 615-625. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3187-8_58
- WANG, X. & DUNSTON, P. S. (2006). Groupware concepts for augmented reality mediated human-to-human collaboration, In *Proceedings of the 23rd Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*.
- WHITESIDE, K., ATKINSON, G., STUMP, M. M., TAMIR, D. & LAWRENCE, G. (2014). Musing : Adaptable Mobile Augmented Reality Application for Museums and Art Galleries. *Electronic Visualisation and the Arts (EVA 2014)*, 229-236.
- WINZER, P., SPIERLING, U., MASSARCZYK, E. & NEUROHR, K. (2017). Learning by imagining history : Staged representations in location-based augmented reality. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10653 LNCS, 173-183. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71940-5_16
- WITMER, B. G. & SINGER, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire [Publisher : MIT Press]. *Presence*, 7(3), 225-240.
- WOJCIECHOWSKI, R., WALCZAK, K., WHITE, M. & CELLARY, W. (2004). Building virtual and augmented reality museum exhibitions, In *Proceedings of the ninth international conference on 3D Web technology*, ACM.
- YANG, J. & CHAN, C. (2019). Audio-augmented museum experiences with gaze tracking, In *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3365610.3368415>
- YOUNES, G., KAHIL, R., JALLAD, M., ASMAR, D., ELHAJJ, I., TURKIYYAH, G. & AL-HARITHY, H. (2017). Virtual and augmented reality for rich interaction with cultural heritage sites : A case study from the Roman Theater at Byblos. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 5, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.03.002>

ZHANG, C., PERKIS, A. & ARNDT, S. (2017). Spatial immersion versus emotional immersion, which is more immersive?, In *2017 Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, IEEE.

ZHOU, Z., CHEOK, A. D., QIU, Y. & YANG, X. (2007). The role of 3-D sound in human reaction and performance in augmented reality environments [Publisher : IEEE]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 37(2), 262-272.