

LA REALITE MIXTE EN GEOGRAPHIE ET AMENAGEMENT : UNE INNOVATION IMMERSIVE PERTINENTE ?

BAILLY ERIC¹, WHAL JULIEN², OKONEK NICOLAS³

1-Maître de Conférences, CMMC, Unité Propre de Recherche 1193, Université Nice Côte d'Azur,
Eric.BAILLY@univ-cotedazur.fr

2-Étudiant, Département de Géographie et Aménagement, Université Nice Côte d'Azur,
Julien.wahl@etu.univ-cotedazur.fr

3-Étudiant, Département de Géographie et Aménagement, Université Nice Côte d'Azur,
Nicolas.okonek@etu.univ-cotedazur.fr

Résumé

Cet article explore comment la réalité mixte (RM) s'inscrit dans la continuité des outils d'aménagement territorial tout en constituant une avancée significative par rapport aux technologies préexistantes. La RM est-elle en mesure de surmonter les contraintes de coût, de faisabilité et d'acceptabilité sociale pour des acteurs tels que les collectivités locales ?

L'objectif de cet article est d'établir en quoi la RM transforme les pratiques de représentation spatiale, en les rendant immersives et plus accessibles. Il s'agit aussi d'évaluer sa possible adoption par des acteurs comme les communes de petites envergures, souvent limitées en matière de budget et de compétences techniques.

L'approche combine une revue historique des outils de visualisation spatiale, une démonstration technique de la RM et une expérimentation concrète à travers deux principales applications : la création de maquettes virtuelles et l'utilisation sur le terrain. Ces développements ont été réalisés avec le casque HoloLens 2 de Microsoft.

La RM apporte une valeur ajoutée significative, notamment grâce à son immersion contextuelle qui facilite la participation citoyenne et la coopération entre les acteurs de l'aménagement. Les résultats montrent qu'elle permet de surmonter certaines limitations des technologies précédentes, telles que la difficulté à se projeter dans des aménagements futurs. Cependant, le coût et les compétences nécessaires restent des obstacles pour son adoption généralisée, en particulier pour les petites collectivités.

Enfin, c'est la combinaison de multiple techniques de visualisation qui garde une pertinence dans la présentation des initiatives d'aménagement, car chaque outil répond à des besoins spécifiques. Cette complémentarité s'adapte ainsi aux différentes étapes et parties prenantes du projet.

Mots clefs : Réalité mixte, aménagement, HoloLens 2, maquette virtuelle, in situ.

MIXED REALITY IN GEOGRAPHY AND PLANNING: A RELEVANT IMMERSIVE INNOVATION?

Abstract

This article explores how mixed reality (MR) aligns with traditional urban planning tools while representing a significant advancement over pre-existing technologies. Can MR overcome the challenges of cost, feasibility, and social acceptability for stakeholders such as local governments?

The aim of this article is to determine how MR transforms spatial representation practices by making them immersive and more accessible. It also seeks to assess its potential adoption by smaller municipalities, often limited in budget and technical skills.

The approach combines a historical review of spatial visualization tools, a technical demonstration of MR, and practical experimentation through two main applications: the creation of virtual models and field use. These developments were carried out with Microsoft's HoloLens 2 headset.

MR offers significant added value, especially through its contextual immersion, which facilitates citizen participation and cooperation among urban planning stakeholders. The results indicate that MR helps overcome certain limitations of previous technologies, such as the challenge of envisioning future developments. However, cost and the required skill set remain barriers to its widespread adoption, particularly for small municipalities.

Ultimately, it is the combination of multiple visualization techniques that remains relevant in presenting urban planning initiatives, as each tool meets specific needs. This complementarity thus adapts to the various stages and stakeholders of the project.

Keywords: Mixed reality, planning, HoloLens 2, virtual modeling, on-site.

Introduction

Dans un contexte où les technologies occupent une place toujours plus importante dans l'aménagement du territoire et la géographie, notamment dans les applications d'analyse spatiale, l'intégration des outils numériques transforme en profondeur les pratiques professionnelles. L'émergence de nouvelles technologies redéfinit les modalités de représentation de l'espace, mais elle influe également sur la façon dont les acteurs de l'aménagement envisagent leurs interventions.

Chaque grande étape de l'aménagement territorial et de sa représentation a été marquée par l'intégration de nouveaux outils, des premiers plans et cartes aux maquettes physiques et à la modélisation 3D. Ces innovations successives ont permis de mieux représenter l'espace et d'introduire plus d'interaction dans les processus de planification.

Les hypothèses qui sous-tendent cette recherche reposent sur l'idée que la réalité mixte (RM) ne se limite pas à être un simple prolongement des technologies préexistantes, mais qu'elle transforme radicalement les possibilités d'exploration, de simulation et de communication spatiales. Nous supposons que la RM permet une interaction beaucoup plus immersive et contextuelle, rendant les projets d'aménagement plus intuitifs, tant pour les experts que pour le public. La capacité de superposer des données spatiales à l'environnement réel semble être un véritable changement d'approche conceptuelle qui mérite évaluation.

Nous nous intéressons également à la question de l'acceptabilité sociale de la RM, notamment à la façon dont elle est perçue par les différents acteurs de l'aménagement et son impact sur la participation citoyenne. Peut-elle surmonter les limites des technologies précédentes, comme la difficulté à se projeter dans des espaces futurs (plans, maquettes) ou le manque de compréhension des représentations abstraites (réalité virtuelle) ?

Enfin, une dernière question porte sur la faisabilité de l'intégration de la RM par des acteurs comme les communes ou les Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI). En effet, le coût, la complexité de mise en œuvre et les compétences techniques requises influencent fortement son adoption. Il est approprié de se demander dans quelle mesure ces acteurs, souvent contraints par des budgets limités et des ressources humaines spécifiques, peuvent tirer parti de la RM pour leurs projets d'aménagement.

La problématique de cette recherche est donc d'exposer comment la réalité mixte (RM) s'inscrit dans cette continuité historique, en quoi elle représente une avancée significative par rapport aux outils précédents, et de déterminer sa faisabilité face aux contraintes évoquées.

Pour répondre à ces interrogations, nous examinerons d'abord l'historique des outils de représentation spatiale, en insistant sur les changements qu'ils ont apportés dans la façon de concevoir et de percevoir l'espace. Ensuite, nous considérerons les aspects techniques et pratiques de la RM à travers des exemples concrets de projets que nous avons menés. Nous montrerons alors si la RM est une avancée dans les champs de l'aménagement et de la géographie, ou simplement une étape supplémentaire dans l'évolution des outils de visualisation spatiale.

1. Plans, maquettes physiques et réalité mixte : évolution des outils en aménagement

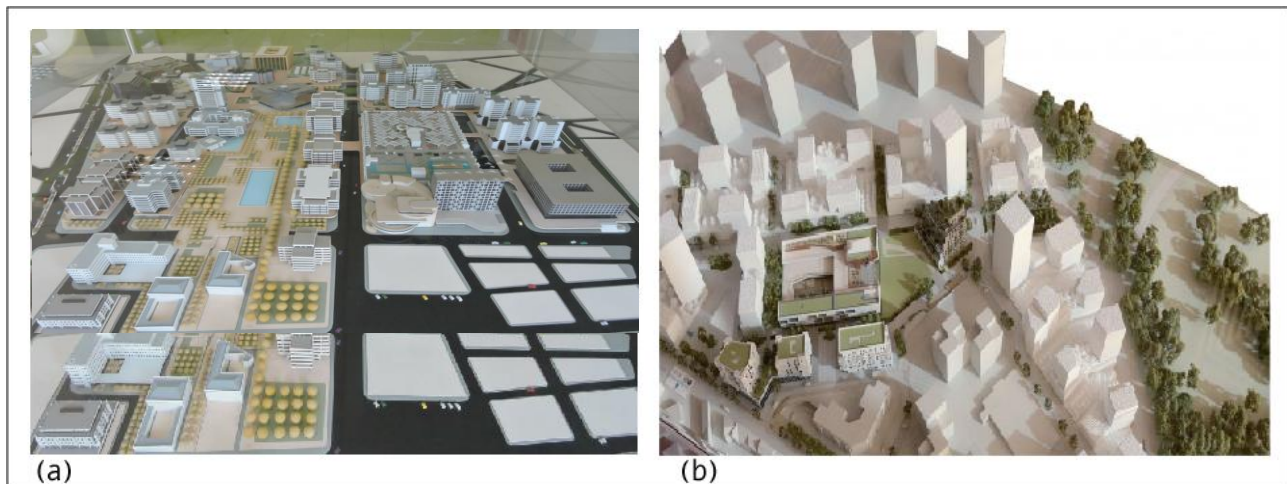
Les plans et les cartographies, utilisés depuis l'Antiquité, ont aidé à représenter les territoires pour la gestion et la planification spatiale. Les Égyptiens les employaient comme cadastres et pour prévenir les risques liés aux crues du Nil (C. SAMOGLINO, 2020, p. 10), tandis que les Romains s'en servaient pour structurer les villes et leurs infrastructures (L. DURET, J.L. NERAUDAU, 2010, p. 72). Les Grecs, quant à eux, les exploitaient pour organiser l'espace urbain. Au Moyen Âge et à la Renaissance, les plans se perfectionnent et conduisent la croissance des villes. À partir du XIX^e siècle, avec l'essor de la topographie et des levés géodésiques, ils acquièrent plus de précisions (H. DESBOIS, 2015, p. 21).

Accompagnant les dessins en 2D, les maquettes physiques en urbanisme ont longtemps été l'outil principal pour visualiser et planifier les études d'aménagement. Ces modèles à échelle réduite étaient réalisés de manière artisanale, en matériaux comme le carton, le bois, le plastique et le polystyrène. Ils permettaient de reproduire fidèlement les volumes, les proportions et les interactions spatiales d'un projet (Exemples disponibles à : <https://maquettesarchitecture.fr/maquettes-durbanisme/>). Il existe d'ailleurs un musée sur les plans en relief (Disponible à : <https://www.museedesplansreliefs.culture.fr/>).

Bien que les évolutions technologiques, que nous aborderons plus loin, aient en partie remplacé ces représentations physiques, l'apparition des imprimantes 3D a facilité la conception des maquettes, et de nombreuses entreprises en proposent aujourd'hui la réalisation. Ces maquettes jouent un rôle important dans la présentation des projets (C. GRESS, K. DUPRE, 2015, p. 6) en favorisant la participation citoyenne et la validation publique. Elles conservent donc leur utilité à certaines étapes clés du processus d'aménagement.

La planche 1 expose deux projets sous forme de maquette à 50 ans d'intervalle, confirmant leur actuel intérêt.

Planche 1 : exemples de maquettes réelles (quartier Mériadeck 1970, Romainville 2024)



Source planche 1-a disponible à : <https://www.sauvegarder-meriadeck.fr/2-construction/>

Source planche 1b disponible à : <https://www.est-ensemble.fr/venez-echanger-autour-de-la-maquette-du-quartier-gagarine-transforme>

Les années 1960-1970 voient l'introduction des ordinateurs et l'avènement de la DAO/CAO (Dessin/Conception Assistée par Ordinateur), qui commencent à remplacer les méthodes traditionnelles. Les logiciels de CAO permettent de créer des plans numériques rigoureux, modifiables et collaboratifs, facilitant l'échange entre les différents acteurs. Du précurseur Sketchpad (1963), développé par Ivan Sutherland lors de sa thèse de doctorat, à des logiciels professionnels comme AutoCAD, le processus de conception s'accélère et se perfectionne. L'informatique introduit ainsi la précision, la conservation, la reproductibilité, et la gestion de versions des plans, révolutionnant le travail des spécialistes (Disponible à : <https://archigrind.fr/la-vie-avant-autocad-histoire-dao-cao/>).

L'évolution naturelle de la 2D est la représentation en 3D qui apporte un réalisme accru et une meilleure appréhension des projets. Contrairement aux maquettes traditionnelles, la modélisation 3D informatique permet des modifications rapides, facilite la collaboration à distance, et offre une maîtrise plus efficace des tarifications et des délais.

Par ailleurs, cette avancée a conduit à l'adoption du BIM (Building Information Modeling) dans les années 2000. Cette, en français, MDB (Modélisation des Données du Bâtiment) dépasse la simple visualisation en intégrant des informations techniques (matériaux, coûts, performances énergétiques, etc.).

La représentation 3D sur écran a cependant des limites. D'abord, l'objet 3D est affiché sur un moniteur bidimensionnel. Ensuite, sa manipulation est parfois complexe et nécessite souvent une phase d'apprentissage. Cette contrainte a suscité de nombreuses recherches visant à développer de nouvelles interfaces homme-machine (E. BAILLY, 2014, p. 1), facilitant l'interaction avec les modèles 3D. Les casques de visualisation sont nés et avec eux la réalité virtuelle (RV).

La RV rend possible l'immersion dans un environnement 3D à échelle réelle, offrant ainsi une expérience plus intuitive des espaces. Les aménagements futurs peuvent être visités virtuellement avant leur réalisation. Cela permet aux concepteurs d'effectuer différentes simulations et apporte au public une meilleure compréhension et acceptation du projet (F. NIEDERCORN, 2022, p. 2).

Toutefois, la RV repose sur un milieu entièrement construit numériquement. L'évolution actuelle consiste à intégrer ces modèles virtuels dans le monde réel, à travers la réalité augmentée (RA) et la réalité mixte (RM), concepts que nous allons aborder dans la partie suivante.

2. Aspects techniques et applications de la réalité mixte (RM) en géographie et aménagement

La RA n'est pas une modification de la RV. C'est une approche différente malgré un matériel qui semble similaire, notamment un casque. En effet, alors que la RA expose le monde réel à l'utilisateur en y ajoutant des objets 3D conçus par informatique, la RV l'immerge dans un milieu entièrement virtuel. Ce dernier pérégrine dans cet univers à l'aide de manettes et de capteurs permettant également d'éviter les obstacles ou dangers potentiels (puisque'il ne voit pas la réalité qui l'entoure).

La RM constitue une évolution de la RA en apportant une interaction directe avec les objets 3D, que l'on peut déplacer ou redimensionner à volonté. Grâce à l'intégration de ces modèles dans des environnements réels, la

RM propose de visualiser, d'interagir et de tester les projets, offrant ainsi la possibilité de les vivre avant leur réalisation.

Ces définitions établies, il convient d'examiner les aspects techniques et matériels des dispositifs et logiciels utilisés.

2.1. Technologies matérielles et logicielles de la réalité mixte (RM)

Le premier appareil de réalité mixte destiné au grand public est le casque HoloLens de Microsoft, apparu en 2016. Il a connu une amélioration avec la sortie de sa version 2 en 2019, toujours commercialisée à ce jour. D'autres solutions de moindre ampleur sont également disponibles, telles que le Magic Leap One (2018), le Varjo XR-3 (2020) et le Meta Quest Pro (2022). Plus récemment, un nouvel acteur majeur a fait son entrée sur le marché avec le lancement du Vision Pro d'Apple en 2024.

Chaque procédé présente ses avantages et inconvénients. Cependant, la puissance de l'entreprise de Redmond et son expertise en programmation font de l'HoloLens 2 la plateforme technologique la plus pertinente à ce jour. C'est donc avec ce casque (Image 1) que nous avons effectué l'ensemble des tests et exemples qui suivent.

Image 1 : Le casque HoloLens 2



Source disponible à : <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/hardware#expériences-en-matière-de-document>

L'HoloLens 2 fonctionne sous un système d'exploitation spécifique, analogue à Windows, mais adapté à la visualisation en RM. Pour développer une application dédiée, il est nécessaire d'utiliser un moteur 3D, comme ceux mis en œuvre par les créateurs de jeux vidéo, à savoir Unity ou Unreal Engine. Unity présente l'avantage d'être parfaitement intégré dans l'écosystème de Microsoft grâce à la plateforme Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK), qui simplifie le développement d'applications de RM sur HoloLens 2.

Pour concevoir des objets virtuels à incorporer dans la visualisation, n'importe quel logiciel de modélisation 3D peut être employé. La compilation des scènes créées dans Unity et le déploiement de l'application sur le casque s'effectuent ensuite via Microsoft Visual Studio. C'est cet environnement complet qui constitue l'un des points forts de la plateforme Microsoft. Cependant, nous n'avons pas eu l'opportunité de comparer cet ensemble avec d'autres solutions concurrentes.

2.2. Deux approches majeures de la réalité mixte (RM) en géographie et aménagement : Maquette virtuelle et utilisation in situ

Les parties précédentes ont permis de poser les bases de la compréhension de la RM. À présent, nous allons détailler les deux principaux modes d'utilisation de la RM dans le domaine de la géographie et de l'aménagement que nous avons expérimentés.

2.2.1. La réalité mixte (RM) comme outil de maquette virtuelle

Ce type d'utilisation permet de concevoir et de visualiser des maquettes numériques en trois dimensions, se substituant aux modèles réduits physiques.

La maquette en RM présente l'avantage de ne pas nécessiter d'espace dédié. En effet, il suffit de disposer du matériel (le casque) et tout bureau peut devenir un lieu de travail. Il est également envisageable de manipuler et déplacer les différentes parties de la maquette, notamment grâce aux fonctions de zoom, ce qui facilite l'exploration détaillée du modèle, et ce, en temps réel. Il est alors possible de tester divers scénarios, idées,

modifications. De plus, la RM encourage une collaboration accrue. Sur site, on peut projeter la maquette sur un écran de grande taille pendant que l'opérateur utilise le modèle à travers son casque. Ainsi le public non équipé peut quand même participer. Cette interaction permet également un déroulement à distance, facilitant la coopération entre des équipes géographiquement éloignées.

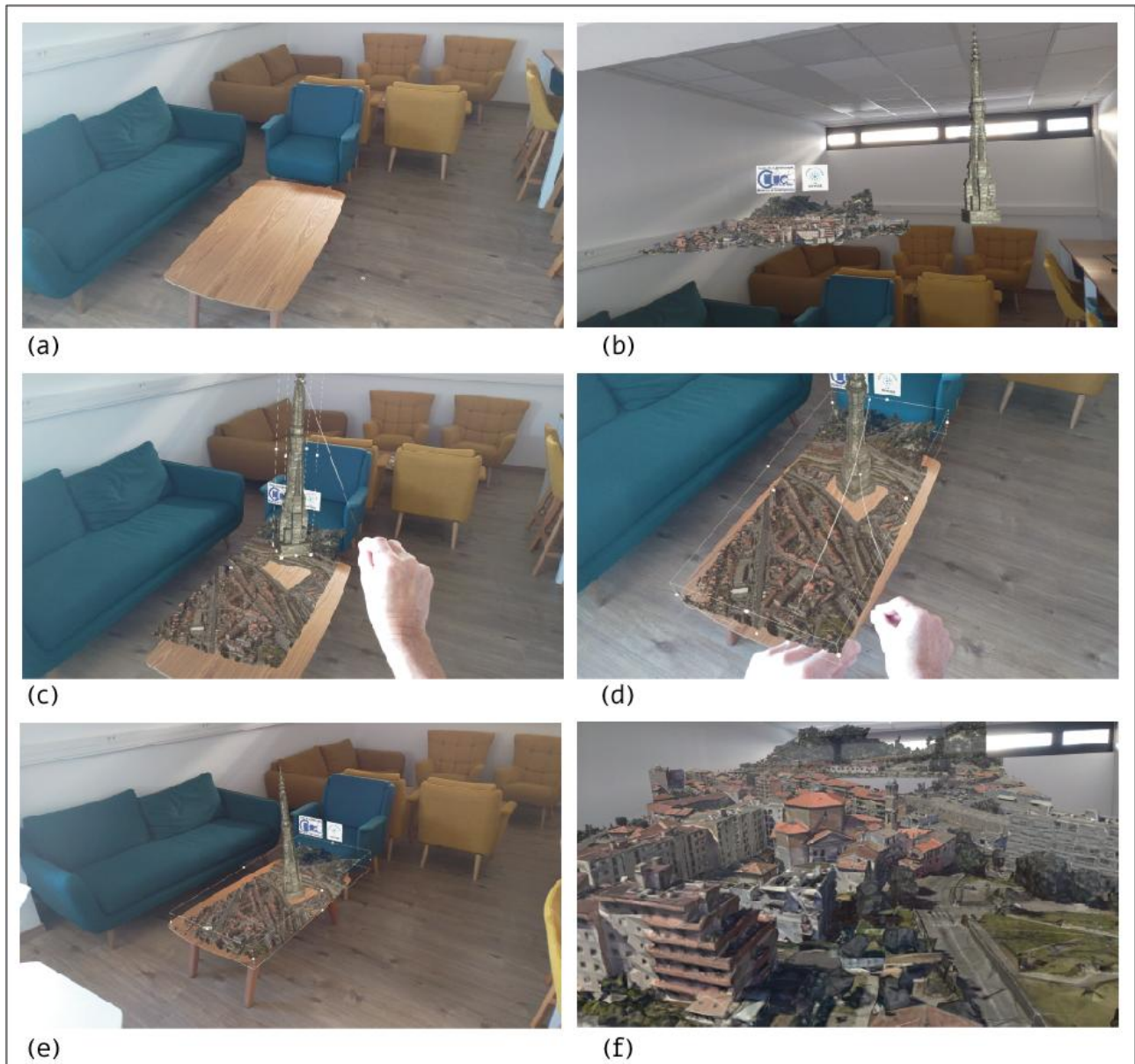
En outre, la gestion des différentes versions ainsi que la duplication et sauvegarde illimitée du modèle, offrent une traçabilité qui autorise de revenir aisément sur des étapes antérieures du projet. Un autre avantage majeur est le placage d'images aériennes sur les objets 3D, qui renforce le réalisme du modèle et lui confère un impact visuel significatif.

Cependant, cette technologie n'est pas sans inconvénient. Outre le coût initial élevé, la création et l'intégration d'une maquette en RM requièrent des compétences avancées, notamment pour la conception du modèle et son adaptation au casque. Comme pour toute solution informatique, des problèmes techniques peuvent survenir, ce qui peut entraver le bon déroulement des opérations.

Enfin, la manipulation d'une maquette en RM peut également être complexe, exigeant un temps d'accommodation et une courbe d'apprentissage pour les utilisateurs (qui reste contenue).

La planche 2 illustre l'exploitation d'une maquette urbaine dans un environnement de bureau (planche 2-a). La maquette (planche 2-b) est divisée en deux parties : la zone urbaine et un bâtiment que l'on peut positionner à l'emplacement souhaité (planche 2-c), (planche 2-d), (planche 2-e). L'utilisateur a la possibilité de se déplacer autour de la maquette pour l'observer sous différents angles et de zoomer pour examiner certains détails de manière plus précise (planche 2-f).

Planche 2 : Utilisation de la RM comme maquettage virtuel



Source : personnelle

2.2.2. L'utilisation de la réalité mixte (RM) sur le terrain

Ici, la RM est exploitée directement sur le terrain, permettant de superposer des modèles virtuels aux environnements physiques existants. C'est une approche véritablement révolutionnaire.

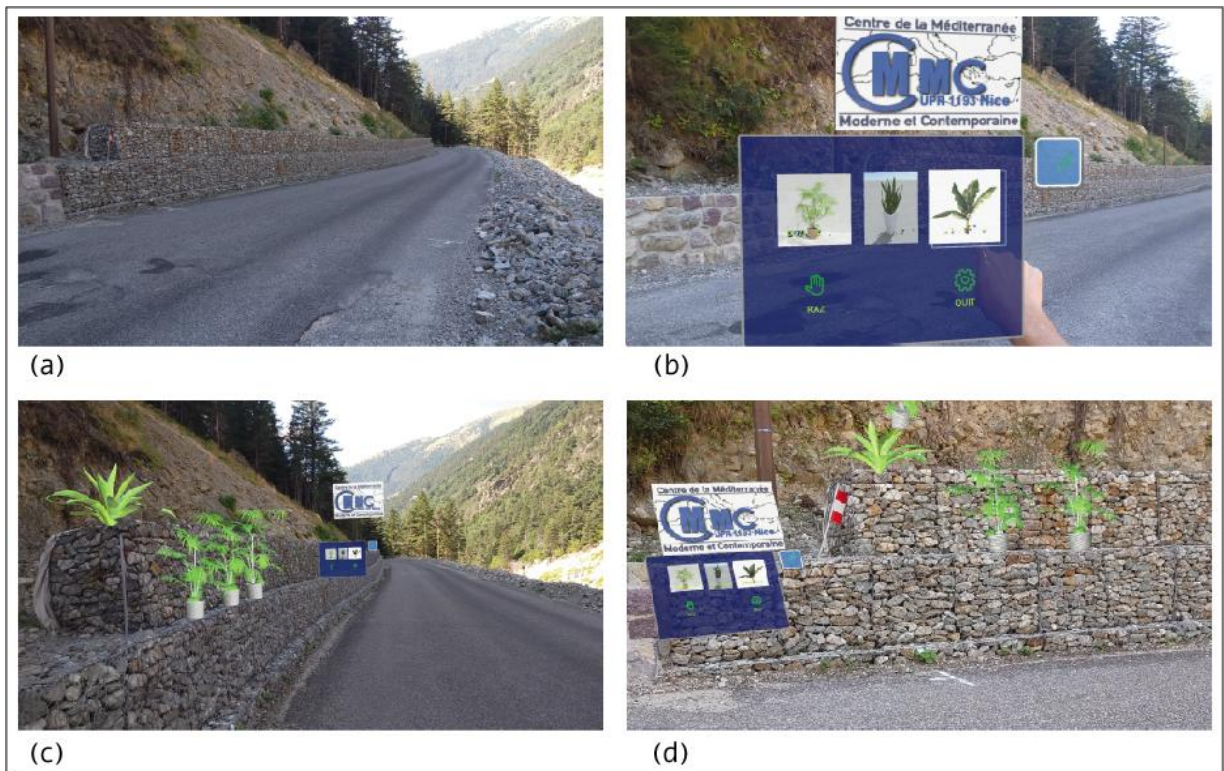
Dans ce premier exemple, nous profitons de la RM pour simuler l'intégration de végétation sur un gabion (planche 3-a) situé dans la vallée du Boréon (Saint-Martin-Vésubie, dans les Alpes-Maritimes, France). En effet, cette vallée de l'arrière-pays niçois a subi de graves tempêtes, entraînant la nécessité de réhabiliter et d'aménager de nombreux sites afin de les sécuriser. Les gabions, assemblages composés de cages métalliques remplies de pierres, sont largement usités dans ces projets en raison de leurs coûts réduits et de leur efficacité pour stabiliser les sols et protéger contre l'érosion.

Notre démarche s'attache à évaluer l'impact visuel des plantations sur l'aspect esthétique d'une structure perçue comme peu plaisante ou monotone. En superposant virtuellement une végétation sur le gabion, l'utilisateur peut non seulement observer l'effet de masquage procuré par la flore, mais aussi d'éprouver diverses configurations paysagères.

L'objectif principal de cette approche est d'enrichir l'attrait visuel du site, en remédiant à l'apparence froide et fonctionnelle du gabion par des éléments naturels capables de s'intégrer harmonieusement dans l'environnement. Cette méthode permet d'expérimenter plusieurs variétés de plantes et de figurer leur interaction avec la structure (planche 3-c et planche 3-d).

Planche 3 : simulation d'aménagement sur site

(planche 3-a) le gabion, (planche 3-b) l'interface de notre application contenant quelques plantes test, (planche 3-c) et (planche 3-d) les plantes virtuelles installées et leur visualisation sous plusieurs angles.



Source : personnelle

Le second exemple illustre l'aménagement virtuel d'un rond-point en y plaçant une ou plusieurs sculptures au centre. Ce rond-point se situe dans la commune de Lucéram, dans les Alpes-Maritimes. L'objectif est de visualiser l'impact de cette installation.

Les planches 4-a et 4-b montrent le rond-point, vierge de tout embellissement. La planche 4-c affiche quatre statues représentant des masques africains, que nous avons sélectionnés pour esthétiser l'espace. Sur la planche 4-d, on observe l'installation des masques tandis que la planche 4-e illustre le résultat final.

Déplacer un objet, changer sa taille ou le faire pivoter sont des opérations simples à réaliser. Il est ainsi envisageable de configurer librement les divers éléments d'aménagement et de créer plusieurs scénarios, en temps réel et directement sur le site.

Un autre avantage de la RM est la possibilité de tourner autour des objets pour les observer sous différents angles, comme le montre la planche 4-f. Les planches 4-g, 4-h et 4-i offrent différentes vues d'un masque unique, dont la taille a été modifiée.

Enfin, la planche 5-j met en lumière un aspect essentiel de notre exemple. La photographie a été prise de l'intérieur d'une voiture après avoir positionné le masque. On peut alors évaluer les impacts visuels que l'aménagement pourrait avoir du point de vue des automobilistes. Cette méthode permet de répondre à des questions telles que : que voit le conducteur ? Y a-t-il un danger potentiel ou des panneaux de signalisation masqués par l'aménagement ?

Planche 4 : simulation d'aménagement d'un rond-point



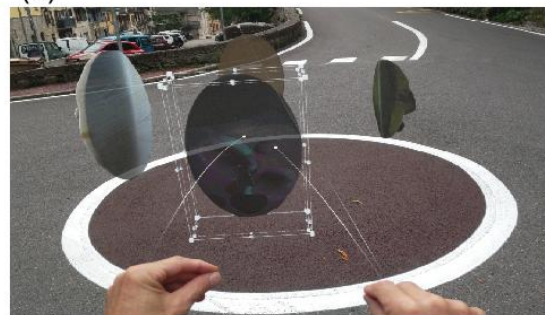
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Source : personnelle

3. Discussion : Enseignements empiriques et analyse critique de l'intégration de la réalité mixte (RM) en géographie et aménagement

L'utilisation des maquettes physiques a longtemps dominé le domaine de la géographie et de l'aménagement, notamment pour leur capacité à offrir une représentation tangible, claire et une visibilité immédiate des projets ou des sites. Leur impact sur le grand public est notable. L'arrivée des imprimantes 3D a grandement facilité leur conception, apportant une réalisation plus rapide et une meilleure diffusion. Toutefois, elles présentent des limites non négligeables : elles prennent de la place, ne permettent ni zoom ni photoréalisme, et une fois construites, elles ne sont ni modifiables ni réversibles (ou difficilement). Leur mise en œuvre est donc complexe.

En parallèle, les modèles 3D sur ordinateur offrent des avantages en matière de simulation et de flexibilité. Cependant, leur visualisation reste restreinte à des écrans 2D, rendant l'expérience peu intuitive pour le public. L'usage de ces outils nécessite aussi une manipulation technique qui n'est pas aisée pour des non-spécialistes. En effet, la courbe d'apprentissage des visionneuses spécifiques à la 3D est importante, réduisant ainsi leur accessibilité.

La RV, qui met en œuvre cette 3D, offre une expérience mitigée pour le public. Il n'est pas toujours simple de s'adapter à un monde entièrement virtuel ni de le pratiquer de manière intuitive. De plus, des troubles physiques tels que des maux de tête et une fatigue visuelle (cybermalaise) sont fréquemment observés (M. MOUSSAVI, Y. JEN, S. MUSA, 2013, p. 34).

La RM apporte une valeur ajoutée significative. L'utilisation des applications créées pour le casque a une courbe d'apprentissage parfaitement maîtrisée. Les multiples expériences que nous avons pu réaliser sur un public très diversifié se sont révélées positives.

La RM change aussi la façon dont les professionnels coopèrent, en facilitant le partage d'informations et la visualisation collective des projets, contrairement aux maquettes qui sont par essence localisées sur un seul site. Si l'avantage de pouvoir travailler sans présence effective est notable, il reste toutefois à étudier la pertinence de ces nouvelles pratiques collaboratives.

Mais surtout, elle intègre les projets directement dans leur environnement réel. Le réalisme de l'affichage proposé permet aux concepteurs du projet de le manipuler, de l'utiliser virtuellement et d'y apporter toutes les modifications nécessaires. La crédibilité de la simulation in situ est un progrès significatif. Naviguer dans les espaces projetés offre une expérience immersive qui surmonte les limitations des maquettes physiques et des modèles 3D (qu'ils soient en RV ou plus traditionnels).

Néanmoins, cette technologie comporte aussi des inconvénients. Le prix demeure élevé, l'Hololens 2 coûtant dans les environs de 4000 euros (Disponible à : <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/buy>).

Cela peut restreindre son adoption par les petites structures ou les collectivités locales disposant de budgets serrés. D'autant plus si l'on souhaite une utilisation collaborative qui nécessite par essence plusieurs casques. Le développement des applications reste, lui, accessible (outils open source ou gratuits), mais demande des compétences techniques importantes.

La visualisation en plein soleil a également posé un problème sensible, car l'affichage devient beaucoup moins lisible. Il convient donc d'utiliser le casque dans des conditions de luminosité adaptées.

De plus, les hologrammes sont gérés en synthèse additive des couleurs, et envoient de la lumière directement dans les yeux de l'utilisateur. Une limitation technologique liée à cette projection de lumière additive est l'impossibilité de bloquer totalement la clarté qui provient de l'arrière-plan. Il en résulte que tous les hologrammes ont une certaine transparence. Les teintes claires sont plus opaques, car elles émettent davantage de lumière. À contrario, les teintes sombres laissant passer plus de lumière apparaissent plus transparentes (R. SMEENK, 2021, p. 1). Ainsi, les objets ont une opacité qui varie selon leur couleur. Concrètement, cela signifie que l'on voit à travers. On peut l'observer sur la planche 4-d (on remarque le marquage au sol à travers le masque) et la planche 4-i (les panneaux indicateurs sont perceptibles). Il est difficile d'obtenir des objets opaques, et nous avons effectué de nombreux tests et recherches à ce sujet. Il en ressort que, pour pallier ce problème, il est conseillé d'employer des couleurs claires et de positionner, à partir d'Unity, un éclairage direct sur chaque objet (si l'on examine attentivement les images, les deux masques clairs sont plus opaques que les deux masques foncés).

Notons que les photos prises par le casque ne reflètent pas fidèlement ce que voit l'utilisateur. En effet, ces images sont recomposées en superposant informatiquement à la réalité les objets 3D. Cette artificialité entraîne une qualité supérieure à celle perçue véritablement par l'utilisateur.

Enfin, nous avons constaté une contrainte liée à la portée maximale de manipulation des éléments virtuels sur l'HoloLens 2. Au-delà de 2 mètres, le maniement des objets devient délicat, la difficulté s'accroissant proportionnellement à l'éloignement. Toutefois, en se déplaçant physiquement avec l'objet virtuel, l'utilisateur peut le positionner à l'endroit souhaité. En revenant à son point de départ, il est alors en mesure d'observer l'objet depuis une distance accrue. Cette approche permet de surmonter les limitations liées à la portée du suivi des mains et offre une perspective plus globale sur l'objet manipulé.

Conclusion

Cet article a présenté deux types d'utilisation de la RM en géographie et aménagement du territoire, illustrant son fort potentiel dans ces domaines. Que ce soit à travers la visualisation de maquettes virtuelles dans des espaces intérieurs ou l'intégration de projets dans leur environnement réel, la RM se distingue par ses capacités immersives et interactives, qui facilitent la prise de décision et la communication entre les différentes parties concernées.

Les résultats montrent que la RM ne se limite pas à être un prolongement des technologies préexistantes. Elle est un véritable changement dans l'exploration et la représentation des espaces. Contrairement aux outils traditionnels tels que les plans papier, les maquettes physiques ou même la modélisation 3D sur écran, la RM apporte une immersion contextuelle qui dépasse la passivité d'un simple affichage. En superposant les éléments virtuels aux environnements réels, elle crée des expériences interactives où les acteurs peuvent tester, manipuler et modifier les projets en temps réel, ce qui les rend plus intuitifs et accessibles. Cela permet non seulement aux spécialistes de mieux appréhender leurs conceptions, mais aussi au grand public de se projeter dans de futurs aménagements, répondant ainsi à certaines limites des technologies précédentes.

Concernant l'acceptabilité sociale de la RM, nos essais montrent que cette technologie a le potentiel de surmonter les barrières souvent rencontrées avec des outils plus abstraits, comme la RV. Grâce à la possibilité de visualiser les projets dans leur contexte physique, la RM favorise une compréhension plus directe et intuitive, tant pour les experts que pour les citoyens. Cela contribue à renforcer l'adhésion et la participation des acteurs locaux, un enjeu crucial pour la réussite des projets d'aménagement. Toutefois, cette adoption reste conditionnée par le coût des dispositifs et la maîtrise des compétences techniques, notamment pour des acteurs tels que les petites communes et les Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI).

In fine, la RM s'inscrit dans la continuité historique des outils d'aménagement tout en apportant une avancée significative par rapport aux outils précédents. Chaque technologie présente ses forces et ses faiblesses, mais elles demeurent cependant complémentaires. Le plan sur papier est indispensable lors de la phase de conception initiale. La maquette 3D physique conserve un impact important pour un auditoire qui peut être nombreux à la consulter. Sa modélisation 3D informatique s'intègre dans la démarche du BIM et peut être réutilisée dans le moteur conceptuel dédié à la RM. Cette dernière permet de vivre les projets dans leur contexte réel avant même leur mise en œuvre. Cette combinaison des approches répond aux divers besoins des professionnels et du public, garantissant une compréhension, une adhésion accrue et une meilleure acceptation des futurs aménagements.

Références bibliographiques

- SAMOGLINO Claire, 2020, *Atlas de l'Égypte ancienne*, Collection Atlas Mémoires, 96 p.
- DURET Luc, NERAUDAU Jean-Pierre, 2010, *Urbanisme et métamorphoses de la Rome antique*, Realia, Les belles lettres, 448 p.
- DESBOIS Henry, 2015, *Les mesures du territoire*, Presses de l'enssib, 240 p.
- BRUNET Roger, 1990, « La naissance de la topographie moderne au XIXe siècle ». *Annales de géographie*, vol. 10, pp. 120-135.
- GRESS Christelle, DUPRE Karine, 2015, « Pourquoi les architectes ont-ils encore besoin de jouer avec des maquettes physiques », Acte du colloque « Questions de pédagogie dans l'enseignement supérieur » 17-19 juin, Brest, France, pp. 823-833.
- BAILLY Éric, 2014, « Manipulation d'objets géographiques tridimensionnels : l'exemple du Leap Motion », in *Géomatique Expert*, n° 97, pp. 52-55.

- NIEDERCORN Frank, 2022, *Un urbanisme plus participatif grâce à la réalité virtuelle*. Disponible à : <https://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/un-urbanisme-plus-participatif-grace-a-la-realite-virtuelle-1885992>, consulté le 10 septembre 2024, 6 p.
- MOUSAVI Maryam, JEN Yap Hwa & MUSA Siti Nurmaya Binti, 2013, « A review on cybersickness and usability in virtual environments », *Advanced Engineering Forum*, vol. 10, pp. 34-39.
- SMEENK Roland, 2021, *Rendering transparency and black on HoloLens*. Disponible à : <https://smeenk.com/rendering-transparency-and-black-on-hololens/>, consulté le 7 avril 2024, 4 p