

Digitalisation du patrimoine : enjeux conceptuels, perspectives de recherche et pratiques d'application

Xiao Jianli, Bai Zhicheng, Mu Xingyu

Résumé

Avec le développement rapide des technologies numériques, la numérisation du patrimoine est apparue comme une approche transformatrice pour sa protection, sa transmission et son innovation. Cet article retrace les origines conceptuelles de cette démarche en s'appuyant sur les chartes de l'UNESCO, en élaborant sa définition et son champ d'application, et en soulignant l'importance des technologies numériques dans la préservation du patrimoine culturel. Par la suite, l'article analyse le processus de développement de la numérisation du patrimoine, de son origine à son expansion, en illustrant l'utilisation de plus en plus sophistiquée des technologies numériques dans la préservation du patrimoine. Il décrit les méthodes techniques de numérisation du patrimoine et examine leur application dans sa documentation, sa protection et sa présentation. De nouvelles perspectives sont proposées sur la recherche en matière de numérisation du patrimoine, notamment la transformation des systèmes traditionnels de protection du patrimoine européen pilotée par les technologies, une réévaluation critique de l'authenticité et de l'intégrité dans le processus de numérisation, ainsi que l'exploration des dimensions sociales liées à cette démarche. À travers des études de cas, cet article met en évidence la valeur significative de la numérisation du patrimoine tant dans un contexte international qu'en Chine. Il est affirmé que la numérisation du patrimoine ne se limite pas à une simple application de la technologie, mais constitue également une réconception de la protection du patrimoine culturel, offrant ainsi de nouvelles opportunités d'implication sociale. Elle propose des perspectives et des stratégies innovantes pour le développement durable du patrimoine culturel.

Mots-clés : protection numérique ; technologie numérique ; développement de plateformes numériques ; gestion du patrimoine ; pratique et éclairage

En octobre 2017, le rapport du 19^e Congrès national du Parti communiste chinois a intégré pour la première fois le concept de « Chine numérique » dans le document programmatique du Parti, marquant ainsi une nouvelle étape dans la construction de cette nation numérique. Avec l'avènement de l'ère numérique, les progrès rapides des technologies numériques ont offert des opportunités sans précédent pour la protection, la transmission et l'innovation du patrimoine culturel. Le patrimoine culturel, témoignage de l'histoire humaine et cristallisation de la sagesse collective, possède des connotations culturelles riches ainsi qu'une valeur historique significative. Toutefois, les méthodes traditionnelles de conservation présentent de nombreuses limites : le vieillissement naturel et la détérioration du patrimoine matériel, ainsi que la diminution du nombre de détenteurs du patrimoine immatériel. Dans ce contexte, la numérisation du patrimoine est apparue, offrant de nouvelles voies pour sa protection et sa transmission.

En 2022, lors des activités commémoratives marquant le 50^e anniversaire de la Convention relative à la protection du patrimoine culturel et naturel mondial, sous le thème « Les prochains 50 ans : le patrimoine mondial comme source de résilience, d'humanité et d'innovation », la transformation numérique a été identifiée comme l'une des cinq domaines clés de recherche et de débat.

Il est donc devenu urgent d'analyser l'état actuel de la recherche et du développement en matière de numérisation du patrimoine, ainsi que de son valeur significative et des voies pratiques qu'il peut offrir au développement urbain et rural contemporain. Cette démarche jouera un rôle positif dans la promotion de la protection, de la transmission et du développement durable du patrimoine historique et culturel à l'ère numérique.

Ces dernières années, la technologie numérique a joué un rôle de plus en plus important dans la recherche sur le patrimoine. D'un côté, la simple documentation de l'environnement physique du patrimoine ne répond plus aux exigences de la protection et de la gestion contemporaines du patrimoine. Se limiter à la préservation des vestiges matériels ne permet pas d'exploiter pleinement la valeur culturelle du patrimoine, ce qui rend difficile la transmission culturelle et le développement durable du patrimoine. D'un autre côté, le changement climatique, les émissions de gaz à effet de serre, les catastrophes naturelles et les dégâts causés par l'activité humaine ont aggravé les défis liés à la protection du patrimoine. La complexité du patrimoine impose des exigences plus élevées aux pratiques de recherche et de gestion, faisant ainsi de la numérisation une tendance majeure et un domaine essentiel dans la recherche et la pratique contemporaines du patrimoine. Le développement des technologies numériques a offert de nouvelles solutions pour la protection du patrimoine culturel.

1 Concept et manifestations de la numérisation du patrimoine

1.1 Origines conceptuelles de la numérisation du patrimoine

La recherche et la discussion sur la numérisation du patrimoine dans le domaine international de la conservation du patrimoine ont une longue histoire. Dès le 15 octobre 2003, l'UNESCO a adopté la Charte sur la préservation du patrimoine numérique, qui souligne la nécessité de préserver et de maintenir « les ressources d'information culturelle, éducative, scientifique et administrative, qu'elles soient générées numériquement ou issues de ressources analogiques existantes, ainsi que les informations dans les domaines technique, juridique, médical et autres » [1], élargissant ainsi le concept et les formes du patrimoine.

La numérisation du patrimoine consiste à utiliser les méthodes de cartographie, la visualisation et les technologies informatiques pour générer ou convertir des informations numériques sur le patrimoine, afin de le protéger, de le gérer et de le présenter, y compris toutes les formes de collecte de données numériques — allant de la photographie, de la rectification d'images et de la photogrammétrie à la numérisation laser en 3D et à l'enregistrement sonore [2]. En bref, il s'agit du processus d'utilisation des technologies numériques pour préserver,

traiter et diffuser les éléments tangibles et intangibles du patrimoine culturel sous forme numérique. Ce processus englobe non seulement le balayage en 3D, l'archivage numérique et la présentation virtuelle des biens culturels tangibles – tels que les artefacts, l'architecture et les ouvrages –, mais aussi l'enregistrement, la diffusion numérique et les modes de transmission innovants du patrimoine culturel intangible, notamment les arts traditionnels, les coutumes et les récits oraux. La numérisation du patrimoine est un processus dynamique.

Le patrimoine culturel numérique désigne le patrimoine culturel présent sous forme numérique, comprenant les documents convertis à partir de matériaux existants en formats numériques ainsi que les matériaux nés numériquement. Ces actifs de patrimoine culturel numérique peuvent prendre la forme de texte, d'images, d'audio, de vidéo, de bases de données, de logiciels et d'autres formats. Le patrimoine culturel numérique met l'accent sur le contenu du patrimoine culturel déjà numérisé ; il s'agit donc d'un résultat statique.

1.2 Manifestations numériques du patrimoine

Selon la Charte sur la préservation du patrimoine numérique, ce dernier « comprend notamment des textes, des bases de données, des images fixes et en mouvement, du son et des graphiques, des logiciels ainsi que des pages web ». En 2006, le Symposium intitulé « rendre transparents les résultats de la recherche visuelle en 3D », organisé par le King's College de Londres, a adopté la Charte de Londres pour la visualisation informatisée du patrimoine culturel (ci-après dénommée « Charte de Londres »). Cette charte a établi des principes pour la représentation numérique du patrimoine culturel^①, et sa version préliminaire 2.1 stipule que « les documents de documentation publiés doivent utiliser les supports les plus efficaces disponibles, notamment des images, du texte, des vidéos, des enregistrements audio, des formats numériques ou des combinaisons de ces derniers »[3–4].

2 Développement de la numérisation du patrimoine

2.1 Émergence de la numérisation du patrimoine (1960-1990)

Les pays européens et nord-américains avaient déjà commencé à numériser les documents et les collections d'archives dès les années 1960, en utilisant des techniques telles que la photographie, l'enregistrement vidéo et la reproduction. Les bases de données ainsi créées servaient initialement uniquement des fins internes avant d'être progressivement mises à disposition du public avec l'avènement d'Internet. Dans les années 1990, les technologies 3D et de la réalité virtuelle ont également commencé à se développer et ont été progressivement appliquées à la recherche en matière de conservation du patrimoine, marquant ainsi le début de l'ère numérique dans ce domaine.

2.2 Développement de la numérisation du patrimoine (1992–2019)

L'année 1992 est généralement considérée comme l'année inaugurale de la recherche sur le patrimoine numérique. L'UNESCO a lancé le programme « Mémoire du monde », visant à utiliser les technologies de l'information modernes et les moyens numériques pour mettre en œuvre la mission de protection du patrimoine culturel mondial telle que prévue dans sa Constitution, à sensibiliser au rôle des nouvelles formes de patrimoine documentaire – notamment les enregistrements audio, les œuvres cinématographiques et télévisuelles ainsi que les médias numériques – et à promouvoir la préservation et la diffusion des ressources patrimoniales à l'échelle mondiale. La même année, Angkor Wat au Cambodge a été inscrit sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO, et une série de mesures techniques numériques reposant sur des systèmes de gestion de l'information assistés par ordinateur ont été mises en œuvre pour sa conservation[5].

2.2.1 Collecte et enregistrement de la numérisation du patrimoine

Les premières applications de la recherche sur la numérisation du patrimoine étaient relativement simples, se concentrant principalement sur la collecte et l'enregistrement du patrimoine culturel sous forme numérique. En 1998, le « Projet Digital Michelangelo », une collaboration entre l'université de Stanford et l'université de Washington, a utilisé des scanners laser et des caméras numériques pour scanner et photographier les sculptures et l'architecture de Michel-Ange afin de les numériser.

Le rôle de la technologie de télédétection dans la préservation du patrimoine culturel à grande échelle a également conduit à une application généralisée de la photogrammétrie, notamment pour documenter les monuments immobiliers tels que les structures monumentales et les sites archéologiques de grande ampleur. En 1968, le Conseil international des monuments et sites (ICOMOS) et la Société internationale de photogrammétrie et de télédétection (ISPRS) ont conjointement créé le Comité international de photogrammétrie architecturale (CIPA). En raison du transfert des technologies pertinentes des sciences du relevé topographique vers la discipline de la documentation et de l'enregistrement du patrimoine, cette entité a été officiellement rebaptisée CIPA Heritage Documentation en 2007, dans le but d'appliquer les technologies de relevé topographique, de visualisation et d'informatique à l'enregistrement, à la conservation et à la documentation du patrimoine culturel^②.

2.2.2 Restauration et présentation du patrimoine

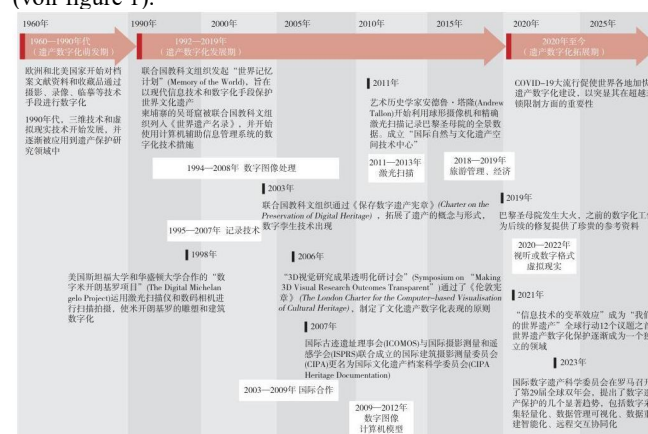
Avec le développement des technologies de réalité virtuelle (RV) et de réalité augmentée (RA), celles-ci ont été largement appliquées dans la recherche sur la conservation du patrimoine, notamment pour la restauration et la présentation du patrimoine culturel disparu, ainsi que pour reconstituer les liens entre ce patrimoine et ses contextes historiques, culturels et environnementaux d'origine. Le Japon a utilisé des scanners 3D pour créer un modèle virtuel du Grand Bouddha de Kamakura, sculpté au XIII^e siècle, et a mis en œuvre la technologie de réalité virtuelle pour reconstruire le hall principal du temple Kotoku-in, détruit lors du séisme de Meiji en

1498. Parallèlement, en raison de leur capacité à offrir aux utilisateurs une sensation plus profonde d'immersion et de réalisme, les technologies de réalité virtuelle (VR) et de réalité augmentée (AR) ont commencé à être utilisées à grande échelle dans le domaine des expositions, des visites touristiques et des expériences interactives, passant des applications internes de recherche et de restauration aux présentations et programmes éducatifs destinés au public. Durant cette phase, la numérisation du patrimoine a commencé à mettre l'accent sur la promotion et la diffusion des informations relatives au patrimoine, tandis que l'utilisation des technologies numériques s'est davantage orientée vers des expériences interactives destinées aux utilisateurs et aux visiteurs. Par exemple, le projet « Eternal Egypt » d'IBM (2001–2004) ainsi que le projet « Sulman Mummy » de l'Université de Chicago ont tous deux présenté le patrimoine à travers des musées numériques en ligne sur Internet[6].

2.3 Élargissement de la numérisation du patrimoine (2020–présent)

La pandémie de COVID-19 a incité les pays du monde entier à accélérer le développement de la numérisation du patrimoine culturel, mettant ainsi en évidence son importance pour dépasser les limites imposées par les mesures de confinement. Par exemple, l'Agence japonaise des affaires culturelles a poursuivi activement le développement du site « Patrimoine culturel en ligne » après 2020, en y intégrant des informations électroniques sur les biens du patrimoine culturel désignés, sélectionnés et inscrits au niveau national. En novembre 2022, des données (incluant des images, des vidéos et des documents textuels) provenant de 1 045 organismes chargés de la gestion des sites du patrimoine mondial, de musées et de galeries d'art avaient été saisies, permettant de consulter et de visualiser publiquement les informations relatives à 273 687 objets du patrimoine culturel③.

En 2021, « L'effet transformateur des technologies de l'information » est devenu le premier des douze thèmes de l'initiative mondiale « Notre patrimoine mondial », et la protection numérique du patrimoine mondial est progressivement devenue un domaine autonome. En 2023, le Comité scientifique international sur le patrimoine numérique a organisé sa 29e Conférence biennale mondiale à Rome, où plusieurs nouvelles tendances dans la protection du patrimoine numérique ont été identifiées, notamment la capture numérique légère, la visualisation de la gestion des données, la reconstruction intelligente des données et l'interaction collaborative à distance [7]. La numérisation du patrimoine est entrée dans une phase d'expansion multidimensionnelle, approfondie et intelligente (voir figure 1).



Chronologie du développement de la numérisation du patrimoine

Fig. 1 Chronologie du développement de la numérisation du patrimoine[8]

2.4 Technologies de numérisation du patrimoine

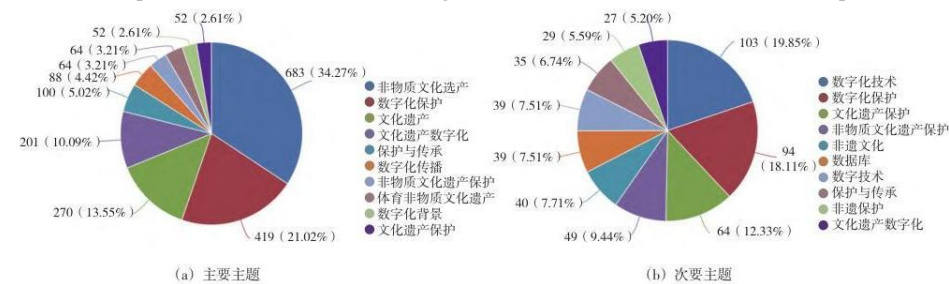
La technologie de numérisation du patrimoine a évolué depuis le simple balayage en 2D jusqu'au modélage 3D complexe, puis à des approches intelligentes assistées par de grands modèles. Actuellement, les technologies de numérisation les plus couramment utilisées sont les suivantes : ① La technologie d'imagerie par balayage laser 3D – permettant d'obtenir des données 3D précises du patrimoine grâce au balayage laser, destinées à sa reconstruction et à son archivage ; ② La photogrammétrie et la technologie de télédétection – qui explorent des images aériennes ou satellitaires pour le suivi et la gestion à grande échelle du patrimoine ; ③ Les technologies de réalité virtuelle (RV) et de réalité augmentée (RA) – offrant des expériences immersives à travers des environnements réels simulés et enrichis, capable de réinventer des traditions disparues afin d'interpréter plus précisément le patrimoine et de faciliter sa compréhension par le grand public. ④ Technologie du jumeau numérique — création de répliques numériques du patrimoine pour une surveillance et une évaluation en temps réel. ⑤ Technologie d'interaction mobile — interactions via les appareils mobiles et médias numériques permettant une diffusion plus large du patrimoine et une expression plus efficace du public. ⑥ Technologie de l'intelligence artificielle — grands modèles d'IA capables d'assister de manière globale la gestion et la recherche sur le patrimoine. Permettant une protection et une planification intelligentes du patrimoine.

3 Questions de recherche et perspectives sur la numérisation du patrimoine

3.1 Tendances et thèmes de la recherche

Une recherche dans la base de données CNKI (Infrastructure nationale du savoir de Chine) utilisant « numérisation du patrimoine » comme mot-clé a révélé un total de 1 451 publications. L'analyse de visualisation bibliométrique a produit les résultats suivants :

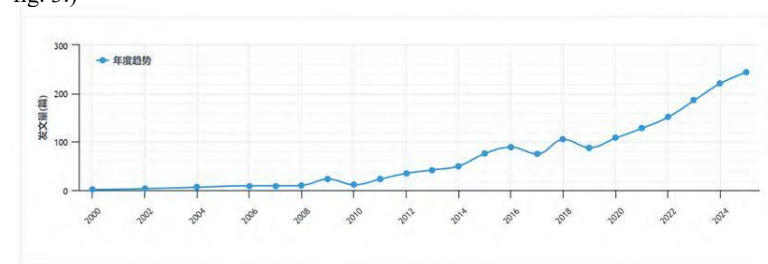
Le nombre de publications sur la numérisation du patrimoine augmente chaque année depuis 2000, avec une forte hausse à partir de 2010, ce qui indique que la recherche dans ce domaine s'est considérablement développée après cette année, en lien étroit avec l'innovation des outils techniques provoquée par l'apparition de la technologie d'imagerie par balayage laser en 2011. Une nouvelle période de croissance rapide est apparue après 2020, stimulée par le développement de la technologie de réalité virtuelle. En 2023, le Comité scientifique international sur le patrimoine numérique a organisé sa 29^e Conférence biennale mondiale à Rome, où plusieurs tendances marquantes ont été identifiées dans la protection du patrimoine numérique : la capture numérique léger, la visualisation de la gestion des données, la reconstruction intelligente des données et l'interaction collaborative à distance, ce qui a déclenché une nouvelle vague de recherches sur la numérisation du patrimoine. (Voir la figure 2.)



Nombre de publications sur la numérisation du patrimoine

Fig. 2 Nombre de publications sur la numérisation du patrimoine

En ce qui concerne les thèmes de recherche, le patrimoine culturel immatériel, les technologies numériques, la protection numérique, la conservation et la transmission, ainsi que la diffusion numérique sont apparus comme des mots-clés majeurs. La numérisation du patrimoine culturel immatériel, nécessitant des technologies numériques relativement simples, a constitué le premier sujet de recherche dans le domaine de la numérisation du patrimoine. La technologie numérique, en tant que facteur déterminant des méthodes de protection du patrimoine, demeure un thème de recherche constant, la protection numérique devenant ainsi un sujet fréquemment abordé. La préservation et la transmission du patrimoine constituent l'objectif principal de cette forme de protection fondée sur les technologies numériques, et ce sujet figure parmi les plus étudiés. Ces dernières années, la présentation et la promotion du patrimoine ont suscité une attention sans précédent, favorisant la participation du public et le partage des valeurs patrimoniales, et sont devenues un axe central de la recherche sur la numérisation du patrimoine. (Voir fig. 3.)



Répartition des thèmes de la littérature sur la numérisation du patrimoine

Fig. 3 Répartition des thèmes de la littérature sur la numérisation du patrimoine

3.2 De nouvelles perspectives issues de la recherche sur la numérisation du patrimoine

À partir d'un résumé des points clés et des thèmes de recherche mentionnés ci-dessus, il est possible d'identifier de nouvelles perspectives issues de la numérisation du patrimoine en vue de sa protection.

3.2.1 Une nouvelle perspective : la transformation du système européen de protection du patrimoine traditionnel pilotée par la technologie

La technologie numérique a élargi les moyens de enregistrement, d'archivage et de gestion du patrimoine, tout en offrant constamment de nouvelles perspectives pour sa protection et ses recherches. Conformément aux principes d'authenticité établis dans la Charte internationale pour la conservation et la restauration des monuments et sites (1964) ainsi que dans les Principes relatifs à l'enregistrement des monuments, des groupes de bâtiments et des sites (1996) dans le domaine de la conservation et de la restauration du patrimoine, les premières recherches sur la numérisation du patrimoine se sont principalement concentrées sur l'enregistrement du patrimoine et la collecte d'informations sur les sites, éléments fondamentaux de ce domaine. En s'appuyant sur les réalisations technologiques numériques des musées, des archives et d'autres institutions, une méthodologie analogue au système européen de protection du patrimoine traditionnel est progressivement développée comme fondement de

la protection numérique, ce qui favorise la normalisation des processus de conservation et de restauration du patrimoine[9].

En 2007, l'Institut de conservation Getty (États-Unis) et ses partenaires ont publié **Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places**, composé de deux volumes : **Guiding Principles** et **Illustrated Examples**. Cette publication a posé les bases nécessaires pour comprendre, planifier et mettre en œuvre des projets de systèmes d'enregistrement et d'information sur le patrimoine, améliorant significativement les capacités des professionnels du domaine en matière de collecte, de traitement et de gestion de l'information [2, 10]. En 2008, Martha Demas a proposé des méthodes de travail spécifiques pour la protection du patrimoine numérique ainsi que quatre principes fondamentaux relatifs à l'enregistrement numérique de base des sites patrimoniaux [11]. L'établissement de données de référence vise à normaliser les travaux de conservation des sites patrimoniaux, qu'ils soient préliminaires ou détaillés. De plus, cette base peut servir de point de départ pour la conception et la mise en œuvre de programmes de surveillance, permettant de détecter les changements qui influencent l'évaluation des valeurs des sites patrimoniaux.

3.2.2 Un nouveau concept : réexaminer l'authenticité et l'intégrité dans le processus de numérisation

La recherche contemporaine sur le patrimoine, qui intègre de nombreuses applications de technologies numériques, se concentre principalement sur l'enregistrement et la simulation de l'environnement physique du patrimoine : par exemple, en utilisant les technologies de télédétection et d'imagerie pour documenter l'état actuel du patrimoine et de son environnement environnant [12–14] ; en recourant à la réalité virtuelle pour représenter les éléments matériels du patrimoine [15–17] ; en créant des modèles numériques et des restaurations virtuelles ; ainsi qu'en élaborant des bases de données sur le patrimoine à partir des informations collectées [18–19], et en utilisant les technologies de réalité augmentée et de jeux vidéo pour la recherche sur la visualisation du patrimoine ainsi que pour le partage des résultats de cette recherche [20].

Les questions d'authenticité et d'intégrité dans le processus de numérisation, ainsi que la manière de concilier l'innovation technologique avec la protection du patrimoine culturel, constituent des sujets de recherche actuels qui ont suscité une réflexion approfondie au sein du domaine.

3.2.3 Une nouvelle orientation : explorer les dimensions sociales de la numérisation du patrimoine

Les dimensions sociales de la numérisation du patrimoine consistent principalement à explorer l'architecture fondamentale des archives de patrimoine numérique, à identifier les modèles optimaux pour fournir des ressources informatives, à étudier les protocoles d'interopérabilité entre bibliothèques numériques, à tester les interfaces utilisateur les plus efficaces, et à relever le défi technique consistant à récupérer de manière efficace les informations recherchées parmi les vastes stocks d'informations disponibles sur Internet, et promouvoir une exploitation plus rentable des archives du patrimoine numérique ainsi que des systèmes de gestion destinés à la protection de la propriété intellectuelle. La recherche sur les dimensions sociales de la numérisation du patrimoine ne se limite pas au domaine en ligne : elle vise à stocker, gérer et rendre accessibles de manière efficace les vastes quantités d'informations réparties dans différentes localisations géographiques et catégories, afin de favoriser un haut degré de partage des ressources et d'obtenir un impact social positif.

Les États membres de l'Union européenne, tels que l'Autriche et l'Allemagne, ont constamment exploré et mis en place des systèmes complets de patrimoine numérique, dotés d'institutions responsables désignées et de soutien financier pour le développement numérique des différents types de patrimoine. Face à un volume considérable de biens patrimoniaux, les pays de l'UE font face à une tâche de numérisation particulièrement ardue et ont progressivement avancé au cours de plusieurs cycles successifs de programmes de projets au cours des quelque trente dernières années. Les plateformes composées de gouvernements, d'administrateurs et de professionnels encouragent le partage et la participation du public ; l'utilisation des terminaux mobiles permet de maximiser l'accès universel à la numérisation culturelle, contribuant ainsi à promouvoir l'intégration européenne et à renforcer le sentiment d'appartenance des citoyens de l'UE.

Le projet « Visualising Ballarat », mené dans la ville de Ballarat en Australie, constitue un exemple réussi d'une plateforme de recherche dédiée à la numérisation et au partage du patrimoine culturel[21, 24]④.

4 Pratiques d'application et valeur positive de la numérisation dans la protection et l'utilisation du patrimoine

4.1 Enregistrement du patrimoine durable : les technologies d'enregistrement numérique créent des plateformes ouvertes et partagées

La documentation exige une capture précise des caractéristiques physiques qui définissent la valeur et les éléments constitutifs du patrimoine. Son objectif principal est de capturer, représenter et transmettre de manière scientifique et efficace les caractéristiques ainsi que les valeurs du patrimoine. Par conséquent, l'identification des caractéristiques du patrimoine constitue la base essentielle pour aborder les travaux de documentation. Tous les éléments, qu'ils soient artificiels ou naturels, doivent être documentés à l'aide de méthodes et d'outils polyvalents et hautement flexibles afin d'assurer l'exhaustivité des archives[21].

Les méthodes traditionnelles de levé sont chronophages et exigeantes en main-d'œuvre, avec des cycles longs de collecte et de traitement des données, ce qui rend difficile la mise à jour régulière des informations. Les nouvelles technologies numériques ont révolutionné la rapidité et la complétude de l'enregistrement des sites patrimoniaux : les méthodes d'enregistrement modernes, telles que le télédétection, la numérisation et l'imagerie, ont innové les approches d'acquisition des informations spatiales sur le patrimoine, nous permettant d'en observer les

caractéristiques sous des perspectives et avec une précision sans précédent, et ont entraîné des progrès révolutionnaires en matière de complétude, de précision et d'efficacité de la collecte des données spatiales [22]. Ces documents peuvent guider les responsables des sites, les chercheurs et les fonctionnaires aux différents niveaux dans leurs processus de prise de décision, tout en mettant en valeur les connaissances historiques et les valeurs du patrimoine [23].

Grâce aux technologies d'enregistrement numérique, l'enregistrement du patrimoine deviendra un processus continu, offrant un suivi dynamique et un soutien permanent à sa gestion. Le partage ouvert constitue une caractéristique essentielle de cet enregistrement : les documents relatifs au patrimoine ne sont plus limités par le temps, le lieu, la culture ou le format. Bien qu'ils soient spécifiques à chaque contexte culturel, ils peuvent être utilisés par toute personne dans le monde. Les résultats des enregistrements sont partagés via des plateformes, devenant ainsi des espaces d'échange et d'apprentissage entre les experts en protection du patrimoine et le grand public ; ils fournissent une expérience pratique riche ainsi que des documents de référence pour la recherche, la restauration, le développement et l'utilisation du patrimoine, et contribuent à la reconnaissance, à la protection et à la diffusion des multiples valeurs du patrimoine.

4.2 Identification intelligente du patrimoine : des technologies de protection numérique visant à prévenir les dommages aux sites culturels vulnérables

Dans le domaine de la conservation du patrimoine, les objets pouvant être traités numériquement se divisent en deux catégories : la première comprend divers types de données analytiques indirectes obtenues à partir de l'analyse du patrimoine ou des données relatives au patrimoine lui-même ; la seconde comprend des données étendues, telles que des modèles numériques et des images de réalité virtuelle générées par affichage numérique, restauration numérique ou d'autres moyens.

Les sites du patrimoine font généralement face à des menaces provenant de divers fronts. L'ingérence excessive de l'homme a laissé de nombreux sites et monuments importants du patrimoine mondial sans une protection adéquate, tandis que les changements environnementaux, les catastrophes naturelles et d'autres menaces ont accru l'urgence de la protection numérique. La numérisation offre un moyen précis et sécurisé de protéger et d'étudier le patrimoine : une fois les informations numériques collectées sur un site, des recherches peuvent être menées à distance, loin du site lui-même. La collecte de données numériques est à la fois précise et pratique, et la recherche hors site constitue l'approche la plus sûre pour les patrimoines fragiles. De plus, le patrimoine étant un élément potentiel du milieu architectural durable, des inspections régulières des structures culturelles sont nécessaires dans le cadre de leur conservation. Des technologies de détection automatique des défauts basées sur l'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour mettre en place des systèmes d'inspection visuelle automatisés.

La préservation et la protection durables des grottes, des fresques et d'autres patrimoines similaires constituent un défi majeur pour la communauté internationale du patrimoine. La numérisation permet de lutter contre les dégradations naturelles telles que l'oxydation, la corrosion, le vieillissement et le dessèchement ou le décollement dus à une intervention humaine excessive. L'Académie de Dunhuang a commencé à explorer les solutions de protection numérique dès 1993 [25–26].

4.3 Conservation durable du patrimoine : les technologies d'archivage numérique au service d'une restauration fiable du patrimoine

L'objectif de la numérisation du patrimoine est de créer des documents pouvant être préservés de manière durable autant que possible, afin de garantir que les informations sur le patrimoine soient transmises de génération en génération et que la continuité soit maintenue même lorsque les valeurs et l'intégrité du patrimoine sont compromises. Par conséquent, l'utilisation de moyens numériques pour archiver de manière systématique les entités patrimoniales enregistrées, divers matériaux et autres informations connexes — en mettant en place des archives scientifiques du patrimoine grâce à une série de procédures standardisées de collecte, de traitement, de stockage et de présentation — peut soutenir les efforts de conservation, de restauration, de développement et d'utilisation. Ces résultats constituent les données fondamentales pour la protection du patrimoine, c'est-à-dire les informations utilisées pour son entretien actif. Au fil du temps, lorsque les sites patrimoniaux sont touchés par des catastrophes soudaines, une érosion naturelle ou des dégradations humaines, les données issues de l'enregistrement numérique deviennent la seule source d'information sur ces sites. Un archivage numérique rigoureux, qui organise de manière systématique toutes les informations relatives au patrimoine, peut constituer un moyen principal pour les chercheurs et le grand public de comprendre un site fondamentalement modifié ou disparu [21]. C'est un outil essentiel dans la course contre la montre : il empêche que le patrimoine ne soit entièrement effacé de la mémoire humaine et garantit que les générations futures disposent de documents facilement compréhensibles.

En 2019, l'incendie de la Notre-Dame de Paris a causé des dégâts importants au patrimoine architectural. Les vastes travaux numériques réalisés avant cet incendie sont devenus une référence inestimable pour la restauration ultérieure. En décembre 2024, la Notre-Dame de Paris a été restaurée avec succès et réouverte au public, recevant des retours positifs tant du côté professionnel que du public^⑤.

4.4 Création de modèles numériques et de bases de données sur le patrimoine : technologies de gestion de l'information numérique qui soutiennent les professionnels dans la gestion du patrimoine

Les informations sur le patrimoine constituent une activité globale incluant l'enregistrement, l'archivage et la gestion de l'information. L'intégration des données constitue également un défi majeur dans l'enregistrement du patrimoine : les informations fragmentées doivent être transformées en connaissances utiles pour soutenir la prise

de décisions relatives au patrimoine, ce qui améliore l'efficacité de son utilisation et reflète plus profondément ses valeurs[27]. Par conséquent, la gestion de l'information — à savoir la découverte, la classification, le stockage et le partage des informations sur le patrimoine pour une utilisation actuelle ou future — joue un rôle essentiel.

L'application intégrée du jumeau numérique, de l'HBIM (modélisation historique des informations sur les bâtiments), du WebGIS et d'autres technologies permet d'acquérir et d'intégrer des données relatives au patrimoine afin de créer des modèles numériques et des bases de données spécialisées. Des méthodes d'analyse numérique complètes sont utilisées pour identifier les caractéristiques numériques, assurant ainsi une évaluation approfondie de l'authenticité et de l'intégrité des sites patrimoniaux. La maturation progressive des systèmes d'information géographique 3D, du traitement géospatial intelligent et des technologies d'apprentissage automatique a considérablement amélioré l'efficacité et la précision de l'identification des caractéristiques et des éléments du patrimoine, offrant ainsi une plateforme de données incontournable pour la gestion des informations relatives au patrimoine paysager culturel [19]. En appliquant les dernières stratégies de capture de la réalité et de documentation spatiale pour documenter le patrimoine, les environnements environnants et d'autres objets à travers le monde, et en créant des outils d'apprentissage numériques ainsi que des collections de bibliothèques fondées sur ces données, il est possible de faciliter l'élaboration de stratégies de planification pour la conservation du patrimoine, la recherche, l'éducation et le tourisme. Grâce à des approches techniques hybrides, tout en préservant respectivement la souveraineté numérique, les différentes solutions de stockage sont intégrées dans divers produits cloud ; les services et outils de travail peuvent être consultés ou contrôlés par l'intermédiaire d'Internet, et une approche hétérogène de la souveraineté des données peut soutenir les processus d'interprétation des droits d'auteur, des droits d'utilisation et de la propriété intellectuelle dans le développement numérique.

En tant qu'infrastructure intangible, les données numériques sont désormais un élément essentiel de la protection du patrimoine culturel. Le enregistrement, l'évaluation, le suivi, l'analyse, la planification et les interventions nécessitent toutes des données numériques. La nature intégrative de l'enregistrement implique que toutes les données relatives au patrimoine doivent être organisées, stockées et gérées sous forme de bases de données. L'unification des structures de données, la normalisation des formats et la standardisation de l'utilisation des données amélioreront considérablement l'efficacité de l'accès aux informations sur le patrimoine[19]. La gestion numérique de l'information répond à la demande croissante dans le domaine international du patrimoine pour des systèmes de registration numérique peu coûteux. Les systèmes de registration du patrimoine doivent être à la fois faciles d'utilisation et personnalisables, tout en exploitant les dernières technologies afin de créer et gérer des informations riches et diversifiées sur le patrimoine.

En 2013, l'Institut de conservation Getty (États-Unis) et le Fonds mondial des monuments ont développé conjointement Arches, une plateforme logicielle open source dédiée à la gestion des données du patrimoine culturel, destinée à aider les scientifiques spécialisés dans la conservation, les professionnels du patrimoine et les institutions spécialisées à enregistrer, étudier et gérer divers types de ressources patrimoniales, ainsi qu'à protéger, récupérer, visualiser, comparer et partager de manière sécurisée les données scientifiques relatives au patrimoine.

4.5 Amélioration technologique de la présentation et de l'interprétation du patrimoine : les technologies éducatives et de diffusion numériques innovent les formats de présentation du patrimoine

Après près de 30 ans de développement, tous les secteurs de la société ont accordé une attention accrue au patrimoine culturel, et la numérisation du patrimoine a progressé rapidement. En ce qui concerne les méthodes de présentation en particulier, la prolifération des modélisations 3D, de la visualisation, de la réalité virtuelle, de la réalité augmentée et d'autres technologies, ainsi que l'apparition de la reproduction cartographique stéréoscopique, ont donné naissance à des outils de présentation multimédia diversifiés et interactifs. Ces innovations ont introduit de nouveaux formats d'affichage et de présentation pour l'éducation et la diffusion des informations sur les sites patrimoniaux.

Grâce à la réalité virtuelle, au modélage 3D, à la photographie panoramique, à la technologie Bluetooth, à la communication de champ proche (NFC), aux technologies de localisation, à l'intelligence artificielle et à d'autres moyens, le patrimoine peut être présenté sous divers formats multimédias. Les organismes chargés de la gestion des sites patrimoniaux stockent et organisent d'importantes quantités de données liées au patrimoine sous forme de musées numériques, les rendant accessibles aux chercheurs et aux utilisateurs pour une consultation, une recherche et une navigation en ligne, tout en proposant des présentations multimédias relatives au patrimoine [28–30]. De nombreux de ces organismes sont équipés de kiosques à écran tactile, de tablettes, de casques multimédias ainsi que de dispositifs de réalité virtuelle (VR) et de réalité augmentée (AR). Des applications mobiles consacrées aux musées du patrimoine, aux sites archéologiques, aux reliques culturelles et aux bâtiments historiques sont désormais disponibles dans les magasins d'applications. Grâce à ces applications, les visiteurs peuvent agrandir l'image pour observer le patrimoine plus clairement et parcourir les bâtiments historiques ainsi que les musées depuis une perspective 360°.

Avec le développement des technologies d'éducation et de diffusion numériques, les organismes chargés de la gestion des sites patrimoniaux utiliseront de manière croissante des outils technologiques innovants pour explorer et promouvoir les valeurs culturelles. Les réseaux à large bande et les bases de données multimédias sont généralement employés pour une gestion intégrée du contenu numérique ; des services de recherche d'information sont proposés au public via des plateformes Internet, et les ressources sont adaptées en conséquence. L'utilisation

de méthodes numériques pour élaborer des principes, des directives et des protocoles relatifs à la documentation, au suivi, à l'interprétation et à la diffusion permet aux responsables des sites patrimoniaux d'améliorer la valeur pratique globale des plateformes numériques, de créer des visites virtuelles et des expositions en ligne, de réaliser une catalogation numérique complète ainsi qu'un partage structuré du patrimoine, et de définir des stratégies de développement du patrimoine numérique ainsi que des critères d'évaluation.

Dès 1996, le ministère français de la Culture a pris l'initiative de lancer un programme de numérisation. En 2018, il a mis en œuvre le Programme national de numérisation et de valorisation des contenus culturels (Programme PNV), une poursuite du programme de numérisation mentionné précédemment, qui mettait particulièrement l'accent sur une mise en œuvre plus globale de la stratégie de numérisation culturelle. Le contenu du programme se concentre de plus en plus sur l'utilisation de contenus culturels, la diffusion culturelle la plus large possible, le développement de l'éducation numérique et la mise en place de nouveaux services en ligne, afin de promouvoir la communication et la valorisation des valeurs du patrimoine culturel, des bâtiments historiques et des collections artistiques.

La recherche en matière de protection du patrimoine fondée sur les technologies numériques contribue également au développement des présentations dédiées au patrimoine. Divers médias numériques s'efforcent de transmettre au public les informations historiques et les valeurs liées au patrimoine de manière plus intuitive et complète. Pour des raisons de sécurité, les bâtiments historiques ou les sites anciens strictement protégés ne font généralement pas accessibles au public leurs intérieurs. Grâce à des simulations de scènes réelles réalisées à l'aide de technologies de réalité virtuelle (VR) et de réalité augmentée (AR) haute précision, les valeurs historiques et esthétiques du patrimoine peuvent être pleinement mis en valeur. De nombreuses universités ainsi que des organismes chargés de la gestion des sites patrimoniaux ont mené des recherches sur les technologies liées à la numérisation du patrimoine dans les domaines de la gestion de l'information, de la réalité virtuelle, ainsi que de la restauration et de la reconstruction numériques. Parmi les exemples figurent le projet « Virtual Egyptian Temple », une collaboration entre l'Université de Pittsburgh et FiatLUX Studio (Canada) ; le projet « Digital Giza », issu d'une collaboration entre l'Université Harvard et la Fondation Andrew W. Mellon ; ainsi que le projet « NINNA-JI GOTEN GARDEN 3D CONTENT », réalisé en partenariat entre le temple de Ninna-ji à Kyoto et la société SUS Corporation.

Depuis la pandémie de COVID-19, l'utilisation de contenus immatériels sur les réseaux sociaux dédiés au patrimoine a constamment augmenté[31]. De nombreuses organismes chargés de la gestion des sites patrimoniaux ont commencé à collaborer avec l'industrie du jeu vidéo afin de renforcer la représentation des valeurs du patrimoine culturel grâce au développement de jeux vidéo sérieux et à des partenariats avec des franchises de jeux vidéo[32], en utilisant les technologies de réalité augmentée (RA) et de réalité virtuelle (RV) pour présenter l'histoire de manière plus vivante au grand public, en particulier aux jeunes.

4.6 Pratiques de numérisation du patrimoine en Chine

4.6.1 À partir des unités désignées pour la protection du patrimoine culturel

La recherche sur la numérisation du patrimoine en Chine a débuté relativement tôt. Elle a été principalement menée par des instituts spécialisés dans l'étude du patrimoine culturel, les principaux sites de patrimoine culturel protégé constituant les objets centraux de cette recherche. À partir de 1993, l'Académie de Dunhuang a mis en œuvre le projet de recherche « Système d'archivage et de gestion informatique des fresques de Dunhuang », utilisant la photogrammétrie à courte distance dans la grotte 45 des Grottes de Mogao pour obtenir des images photographiques en film inversé de haute qualité et grande précision des fresques, puis procédant à leur numérisation afin de produire des images numériques de ces dernières. À la fin de l'année 1998, l'Académie de Dunhuang, en collaboration avec l'université Northwestern et la Fondation Mellon, a mené le projet de recherche conjoint intitulé « Numérisation des fresques de Dunhuang et Archiv international numérique de Dunhuang ». Grâce à une coopération technique et à une mise en œuvre coordonnée, une approche méthodologique pour la numérisation des fresques en deux dimensions a été élaborée, permettant de réaliser une numérisation complète de plus de 20 grottes représentatives des Grottes de Mogao qui avaient déjà été publiées[26]. En 2001, le Musée du Palais a officiellement lancé son site web, marquant ainsi la première étape vers la création d'une base de données complète de matériaux architecturaux historiques. En 2004, la technologie de levé par laser en 3D a été utilisée pour la construction numérique de la Cité Interdite. En 2017, l'Université du Zhejiang et l'Institut de recherche sur les grottes de Yungang de la province du Shanxi ont collaboré pour créer une réplique à échelle 1:1 de la grotte 3 des grottes de Yungang en utilisant la technologie d'impression 3D, marquant ainsi le premier projet mondial de reproduction à grande échelle d'un site patrimonial réalisé grâce à cette méthode. Ces dernières années, l'Administration nationale du patrimoine culturel a successivement publié des documents réglementaires départementaux relatifs à la protection numérique des sites relevant du patrimoine culturel, notamment le temple de Qutansi, l'ancien site de l'usine de ciment Huaxin et le temple de Fuzhen sur la montagne Wudang.

4.6.2 Digitalisation du patrimoine : renforcer la protection des villes historiques et culturelles

Les éléments de la protection du patrimoine numérique dans les zones urbaines historiques sont nombreux et comprennent principalement la collecte et la classification des données patrimoniales, la description et la présentation des ressources historiques, l'organisation de bases de données destinées au stockage à long terme, le recueil d'informations par requête ainsi que la diffusion interactive auprès du public. Le processus de numérisation du patrimoine se déroule en trois étapes : ① Information numérique. Dans les zones urbaines historiques, cette méthode peut être appliquée à la vectorisation des données géographiques, des informations cadastres et de la

documentation architecturale. En comparant les modifications du système cadastre, il est possible d'analyser le processus de transformation urbaine. Les divers événements de planification et de construction dans ces zones sont catalogués, enregistrés et classés chronologiquement. Un cadre cognitif est utilisé pour analyser les changements survenant dans les bâtiments, les routes, la structure spatiale urbaine et les usages fonctionnels, évaluer la valeur de conservation et de transmission du patrimoine culturel, et associer directement les données cadastres, les références documentaires et les conclusions analytiques aux bâtiments physiques. ② Plateformes numériques. Ces éléments intègrent la base principale de données archivistiques destinée à la gestion et à la protection des zones urbaines historiques, en mettant en place des plateformes de numérisation du patrimoine qui unifient la répartition des tâches et la coordination de la gestion de cette numérisation dans ces zones. ③ Normes numériques. Des spécifications techniques et des normes d'évaluation correspondantes ont été élaborées pour la protection numérique du patrimoine dans les quartiers culturels historiques ou les zones urbaines historiques, afin de soutenir la protection et la gestion, l'aménagement, la recherche académique ainsi que les services communautaires liés à la pratique de la numérisation du patrimoine [33–34].

Actuellement, la Chine a mis en œuvre des pratiques de numérisation du patrimoine relativement riches et pluridimensionnelles dans les villes historiques et culturelles.

Au niveau provincial, la province du Sichuan a mis en place une plateforme de données 3D dédiée aux ressources historiques et culturelles urbaines et rurales, permettant la collecte, l'intégration et la présentation centralisées des données géographiques de base, des ressources historiques et culturelles ainsi que des données de modèles 3D pour toute la province. Cela offre un soutien fondamental ainsi qu'un cadre analytique pour la gestion, la planification et la conception, la protection et l'utilisation des ressources historiques et culturelles, renforçant ainsi de manière significative la capacité de la province du Sichuan en matière de protection et de gestion de ces ressources⑥.

Au niveau municipal, en 2018, le district historique et culturel de la route Enning à Guangzhou a réalisé le premier balayage 3D et levé topographique de ses principales rues. Sur cette base, la plateforme numérique « Mémoire de Guangzhou » a été mise en place : il s'agit du premier projet de mémoire urbaine piloté par les autorités publiques en Chine, destiné à promouvoir de manière systématique l'accès du public et la diffusion de l'histoire et de la culture de Guangzhou. Guangzhou est désormais entrée dans la phase des technologies intelligentes et a développé un sous-modèle pour la protection de sa ville historique, basé sur le grand modèle d'aménagement urbain de Guangzhou, « CanPlan ». En s'appuyant sur la plateforme de recherche sur la ville historique et culturelle de la Société d'aménagement urbain, un vaste modèle linguistique a été mis en place, comprenant les informations de base sur les ressources historiques et culturelles de Guangzhou, les plans de conservation des quartiers historiques et culturels, ainsi que les données 3D relatives aux bâtiments et à l'environnement et d'autres éléments relatifs à la gestion de la planification[32]. Guangzhou a par ailleurs approfondi l'élaboration d'une série de normes de protection numérique, comblant ainsi les lacunes existantes dans le secteur et fournissant des orientations scientifiques et standardisées pour ses activités⑥.

Parallèlement, Suzhou a mené des recherches pratiques approfondies sur la conception de jumeaux numériques et de plateformes numériques. La ville a mis en place la Plateforme Suzhou CIM+ pour la protection et la revitalisation de sa cité historique, proposant de manière innovante une architecture de jumeau numérique dédiée à la vieille ville de Suzhou. Anéantie par les enjeux liés aux scénarios et aux technologies numériques, cette approche résout la contradiction entre la protection des villes anciennes et leur développement de revitalisation, favorise une croissance durable de la vieille ville de Suzhou, et explore la revitalisation numérique des méthodes de construction traditionnelles, l'évolution numérique des modes de vie traditionnels ainsi que le renforcement numérique des valeurs culturelles traditionnelles dans cette ville[35].

Au niveau rural, le Musée numérique des villages traditionnels chinois du comté de Jinzhai, dans la province d'Anhui, constitue un exemple emblématique. Ce comté compte 5 villages traditionnels reconnus au niveau national et 20 au niveau provincial. Conçu autour de la configuration spatiale caractéristique « montagne – village – champ – forêt », le musée utilise des technologies multimédias, des visages panoramiques et d'autres formats pour présenter de manière exhaustive les valeurs et les connotations uniques de ces villages, créant ainsi un musée numérique alliant valeur éducative, interaction captivante et attrait visuel, et permettant la protection et la transmission numériques des villages traditionnels⑦.

5 Conclusions et perspectives

5.1 La nature orientée par la demande de la numérisation du patrimoine exige des recherches capables de répondre rapidement aux défis du monde réel et de mettre en place des plateformes de recherche sur les données.

Que ce soit face au changement climatique, au surtourisme ou à la reprise économique dans l'ère post-pandémique de la COVID-19, les défis auxquels sont actuellement confrontés les sites patrimoniaux sont étroitement liés aux transformations et aux crises qui émergent constamment à travers le monde. Bien que la numérisation peine à remplacer l'entité physique du patrimoine, il est indéniable qu'elle peut atténuer ou retarder diverses formes de dommages inévitables au patrimoine, compenser les insuffisances de sa diffusion, favoriser l'intégration régionale et renforcer le sentiment d'appartenance culturelle. De nombreuses agences chargées de la gestion des sites

patrimoniaux maintiennent des liens avec le public grâce à un nombre croissant d'initiatives numériques, répondant rapidement aux défis concrets afin de faciliter la mise en place de plateformes de recherche basées sur les données. Les gouvernements nationaux poursuivent également la mise en œuvre et la planification stratégique du patrimoine ainsi que de son développement numérique.

5.2 La nature fondée sur la technologie de la numérisation du patrimoine fait que la recherche porte principalement sur la mise en œuvre des technologies numériques dans la protection du patrimoine culturel, et s'efforce constamment d'avancer vers une informatisation accrue, une intensification des processus, une interaction renforcée et un niveau élevé d'intelligence.

La technologie numérique constitue un outil puissant pour l'enregistrement et la visualisation du patrimoine. Elle est passée d'une simple enregistrement et archivage numériques à la modélisation 3D, au reconnaissance des objets, aux bases de données spécialisées et à l'intégration des technologies de l'information. L'émergence des technologies d'interaction numérique, incarnées par la réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (AR), pousse constamment la recherche sur la numérisation du patrimoine vers une plus grande informatisation, une intensification des processus, une interaction accrue et une dimension intelligente. Bien que la recherche sur la numérisation des patrimoines ait accumulé des décennies d'expérience précieuse, et malgré les améliorations continues et itératives des réseaux informatiques, des données massives et d'autres technologies scientifiques, ce domaine se trouve encore à une phase d'accumulation d'expériences tout en ajustant sa orientation face aux évolutions technologiques. Il reste un large espace de développement et un potentiel considérable pour l'avenir.

5.3 La numérisation du patrimoine entraîne une transformation du système traditionnel de protection du patrimoine

La numérisation du patrimoine vise à protéger et à transmettre le patrimoine culturel grâce aux technologies numériques, afin de le préserver durablement et de le diffuser largement dans l'espace numérique. La transformation du système européen de protection du patrimoine traditionnel, pilotée par les technologies, a amené à une réflexion renouvelée sur les questions d'authenticité et d'intégrité dans le processus de numérisation, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour explorer les dimensions sociales de cette numérisation. La numérisation du patrimoine a apporté des contributions pratiques significatives à la documentation continue du patrimoine, à l'identification intelligente de ses vulnérabilités, à la fiabilité des restaurations, à la création de modèles numériques et de bases de données spécialisées, ainsi qu'à l'amélioration technologique de la présentation et de l'interprétation du patrimoine.

5.4 La Chine dispose de pratiques relativement avancées en matière de numérisation du patrimoine, tant pour la protection du patrimoine culturel que pour celle des villes historiques et culturelles ; cependant, elle a un besoin urgent d'une législation nationale sur la protection de cette numérisation, ainsi que de l'élaboration de spécifications techniques et de normes d'évaluation adaptées à la numérisation du patrimoine dans les zones urbaines historiques.

En s'appuyant sur les pratiques existantes, il convient d'accélérer les efforts visant à créer des bases de données de planification urbaine interdisciplinaires et interdépartementales, à élaborer des modèles numériques de protection du patrimoine dans les zones urbaines historiques, ainsi qu'à mettre en place des bases de données dédiées au patrimoine de ces zones. Ces éléments doivent être intégrés au système existant de planification urbaine historique et culturelle afin de mettre en place des plateformes numériques de protection du patrimoine dans les zones urbaines historiques, offrant ainsi un soutien en données authentique et efficace à la préservation de ces villes. Les données relatives au patrimoine des zones urbaines historiques doivent également être partagées ouvertement entre les différentes parties prenantes dans le cadre de protections par le droit d'auteur, afin de faciliter leur utilisation publique. Il convient de souligner que, bien que la numérisation du patrimoine soit devenue un moyen extrêmement important de préserver et de diffuser les informations sur ce dernier, elle ne doit pas remplacer la protection physique ainsi que l'utilisation des objets du patrimoine pour leur exposition.

À l'avenir, il conviendra de se concentrer sur les défis liés à la disparition des données du patrimoine numérique et aux limites cognitives ; sur la manière de trouver un équilibre entre le virtuel et le réel afin que les valeurs du patrimoine puissent être transmises de manière complète et approfondie ; sur l'établissement d'un cadre éthique et de codes de pratique pour la protection numérique ; ainsi que sur la conception de stratégies de protection intelligentes [36–37].

La numérisation du patrimoine a favorisé l'échange d'informations entre les chercheurs de divers domaines et à travers le monde, mettant en lumière la complexité du monde contemporain. Cela générera des changements ainsi que des opportunités de développement pour le patrimoine, en accord avec les tendances du développement social ; il s'agira également d'un résultat inévitable et d'une exigence pratique du développement de la recherche sur le patrimoine.

Remerciements

Les auteurs remercient Liang Guofeng, Xu Haowen et Zhou Haidong pour leurs contributions à cet article.

Notes

Une partie du contenu est extraite du site officiel de la London Charter : <http://www.londoncharter.org/>.

② Certains éléments proviennent du site officiel de CIPA Heritage Documentation : <https://www.cipaheritagedocumentation.org/>.

③ Certains contenus sont extraits du site officiel de Cultural Heritage Online (文化遺産オンライン) : <https://japanheritage.bunka.go.jp/ja/>.

④ Certains contenus sont extraits du site officiel de Visualising Ballarat : <http://www.visualisingballarat.org.au/>, du site officiel de HUL Ballarat : <https://www.hulballarat.org.au/> et du site officiel de la Victoria Heritage Database : <https://vhd.heritagecouncil.vic.gov.au/>.

⑤ Certains éléments proviennent du site officiel d'Arches : <https://www.archesproject.org/>.

⑥ SHI Yujun. Pratiques numériques et intelligentes pour la protection et la gestion de la ville historique de Guangzhou. Troisième forum CIM sur la construction des villes intelligentes : les technologies numériques renforcent la préservation et la transmission des villes historiques et culturelles, 29 décembre 2024.

⑦ ZHANG Honghui. Les technologies numériques renforcent la protection des ressources historiques et culturelles. Troisième forum CIM sur la construction des villes intelligentes : Les technologies numériques renforcent la protection et la transmission des villes historiques et culturelles, 29 décembre 2024.

Références

[1] UNESCO. Charte sur la préservation du patrimoine numérique [S]. Paris : 32e session de la Conférence générale de l'UNESCO, 18e réunion plénière, 2003.

[2] LETELLIER R, SCHMID W, LEBLANC F. Enregistrement, documentation et gestion de l'information pour la conservation des lieux patrimoniaux. Volume 1 : Principes directeurs [M]. Los Angeles : Institut de conservation Getty, 2007.

[3] Laboratoire de visualisation de King's, King's College London. Charte de Londres pour la visualisation informatisée du patrimoine culturel, projet 2.1 [R]. Londres : Symposium sur « La transparence des résultats de la recherche visuelle en 3D », 2012.

[4] BEACHAM R, DENARD H, NICCOLUCCI F. Introduction à la Charte de Londres [C] // IOANNIDES M, ARNOLD D, NICCOLUCCI F, et al. L'évolution des communications et des technologies de l'information dans le patrimoine culturel, Actes de la conférence VAST. Budapest : Archaeolingua, 2006 : 263–269.

[5] BOX P. Gestion des systèmes d'information géographique et des ressources culturelles : Un manuel pour les gestionnaires du patrimoine [M]. Bangkok : Bureau régional principal de l'UNESCO pour l'Asie et le Pacifique, 1999.

[6] JACOBSON J, HOLDEN L. Le temple égyptien virtuel [C] // KOMMERS P, RICHARDS G. Actes de l'ED-MEDIA 2005 — Conférence mondiale sur les multimédias éducatifs, l'hypermédia et les télécommunications. Montréal : Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2007 : 4531–4536.

[7] YANG Chen, CHEN Zhengyu. Protection numérique du patrimoine culturel et naturel mondial et nouvelles tendances internationales [J]. Landscape Architecture, 2023, 30(10) : 96–102.

[8] YANG Chen, WANG Zhiru. Étude de faisabilité sur l'affichage et les applications numériques du patrimoine des jardins classiques du Jiangnan [J]. Garden (Yuanlin), 2024, 41(9) : 19–28.

[9] ZHANG Song. Leçons tirées des chartes européennes de conservation du patrimoine et des pratiques de protection urbaine en Chine [J]. City Planning Review (Journal of Urban Planning), 2024(2) : 64–70.

[10] EPPICH R, CHABBI A. Enregistrement, documentation et gestion de l'information pour la conservation des lieux patrimoniaux. Volume 2 : Exemples illustrés [M]. Los Angeles : Getty Conservation Institute, 2007.

[11] DEMAS M. Planification de la conservation et de la gestion des sites archéologiques : une approche fondée sur les valeurs [M] // TEUTONICO J M, PALUMBO G. Planification de la gestion des sites archéologiques, atelier international organisé par l'Institut de conservation Getty et l'université Loyola Marymount, 19–22 mai 2000. Los Angeles : L'Institut de conservation Getty, 2002 : 27–54.

[12] KUBLER B. Les stratégies de médiation numérique dans les musées : une étude exploratoire sur la mise en œuvre stratégique [C]. Atelier ORNUM : Organisation et Numérique, CREGO Dijon, 2019.

[13] KUBLER B. Les stratégies numériques en pratique dans les organisations muséales : le cas des outils interactifs de médiation culturelle [C]. Sorbonne, Paris : 8e colloque AIRMAP « Territoires intelligents et gestion publique durable », 2019.

[14] QUINTERO M S. Protéger le patrimoine architectural : défis liés à la numérisation des ressources culturelles [C] // 2e Symposium international sur la conservation et la numérisation du patrimoine culturel. 2012 : 6–17.

[15] SHORT M. Évaluation de l'impact des propositions concernant les bâtiments élevés sur le patrimoine architectural : les villes régionales de l'Angleterre au XXIe siècle [J]. Progress in Planning, 2007, 68(3) : 97–199.

[16] VANEGAS C, ALIAGA D, MUELLER P, et al. Modélisation de l'apparence et du comportement des espaces urbains [J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(1) : 25–42.

[17] GUHATHAKURTA S, KOBAYASHI Y, PATEL M, et al. Projet Digital Phoenix : un voyage multidimensionnel à travers le temps [M] // HAGEN H, GUHATHAKURTA S, STEINEBACH G. Visualiser la planification durable. Berlin et Heidelberg : Springer, 2009 : 159–184.

[18] NORRIS S, WALSH M J, KAFFENBERGER T A. Visualisation de Famagusta : approches interdisciplinaires pour l'étude de la cathédrale orthodoxe de saint Georges des Grecs à Famagusta, Chypre [J]. Archives and Manuscripts, 2014, 42(1) : 48–60.

- [19] PETTY Z, LANDRIEU J, COULAIS J, et al. Problèmes de mise à l'échelle dans l'espace et le temps en gestion des données : la restauration virtuelle du patrimoine clunien [J]. *Applied Geomatics*, 2012, 6(2) : 71–79.
- [20] MORTARA M, CATALANO E C, BELLOTTI F, et al. Apprendre le patrimoine culturel à l'aide de jeux sérieux [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(3) : 318–325.
- [21] GUO Xiaotong, YANG Chen, HAN Feng. Innovation dans l'enregistrement numérique et la conservation du patrimoine paysager culturel [J]. *Chinese Landscape Architecture (China Garden)*, 2020, 36(11) : 84–89.
- [22] HADDAD N. De la topographie au scanner laser 3D : une revue des techniques utilisées pour la documentation spatiale des sites historiques [J]. *Journal de l'Université King Saud – Sciences de l'ingénierie*, 2011, 23(2) : 109–118.
- [23] QUINTERO M S, AWAD R, BARAZZETTI L. Utilisation des flux de travail numériques pour mieux comprendre, promouvoir et encourager la participation à la conservation des sites patrimoniaux en faceant les défis éthiques et techniques [J]. *Built Heritage*, 2020, 4(6) : 1–18.
- [24] YANG Chen. Paysage du patrimoine numérique : la pratique et l'innovation numériques du paysage historique urbain à Ballarat, en Australie [J]. *Chinese Landscape Architecture (China Garden)*, 2017, 33(6) : 83–88.
- [25] FU Xinyi, MA Xiaojuan, SUN Zhijun. Recherche sur la restauration numérique des fresques endommagées : une étude de cas des fresques de Dunhuang [J]. *Art & Design (Décoratif)*, 2019(1) : 21–27.
- [26] CHEN Zhenwang, FAN Jinshi. L'application de l'intégration culturelle et technologique dans la protection du patrimoine culturel : une étude de cas sur la numérisation des grottes de Mogao à Dunhuang [J]. *Dunhuang Research (Dunhuang Research)*, 2016(2) : 100–107.
- [27] YANG C. Utilisation d'un « modèle interprétatif » pour la conception contextuelle des bases de données sur les paysages patrimoniaux : le cas du parc national de l'île Saint-Hélène au Queensland, en Australie [J]. *Geographical Research*, 2015, 53(3) : 321–335.
- [28] JARRIER E. Une approche expérimentale des effets de l'utilisation d'un outil interactif dans le domaine culturel : une application aux musées d'art [D]. Dijon : Université de Bourgogne, 2015.
- [29] MENCARELLI R, RIVIERE A. La participation du client dans un contexte de services self-service technologiques [J]. *Revue Française de Gestion*, 2014, 241(4) : 13–30.
- [30] MEUTER M L, BITNER M J, OSTROM A L, et al. Choix entre différents modes de prestation de services : une étude sur l'expérience des clients avec les technologies d'autoservice [J]. *Journal of Marketing*, 2005, 69(2) : 61–83.
- [31] Kubler B. Culture médiante et gamification : Quand le musée convoque le jeu [J]. *Espaces : Tourisme et loisirs*, 2021, 378 : 15–18.
- [32] KUBLER B. Voyage dans le monde des applications destinées aux visites muséales : tendances, perspectives et mesure de l'interactivité des applications des Musées de France [C]. Paris : L'expérience du visiteur au musée : sources, formes, enjeux théoriques, Atelier du troisième cycle de l'École du Louvre, 2020.
- [33] HE Yan, MA Yinghua. Recherche sur les technologies numériques renforçant la protection et la transmission des villes historiques et culturelles [J]. *China Ancient City (China Mingcheng)*, 2024, 38(4) : 70–76.
- [34] ZHU Jinglu, QIN Jie. Traduction et promotion numériques de la protection des villes historiques et culturelles : une étude de cas de la plateforme numérique « Guangzhou Memory » [J]. *Planners (Planificateurs)*, 2021, 37(22) : 51–54.
- [35] YANG Tao, LI Jing, LI Mengyao, et al. Méthodes de jumeau numérique pour la protection et la revitalisation du patrimoine historique et culturel dans l'ancienne ville de Suzhou [J]. *City Planning Review (Journal of Urban Planning)*, 2024(1) : 82–90.
- [36] WU Zhiqiang. Les dix mots-clés principaux du développement de la discipline de l'aménagement urbain et rural (2023–2024) [J]. *City Planning Review (Journal of Urban Planning)*, 2023(6) : 1–4.
- [37] GAN Wei, WU Zhiqiang, WANG Yuankai, et al. Élaboration d'un modèle théorique pour la conception urbaine assistée par l'AIGC [J]. *City Planning Review (Journal de planification urbaine)*, 2023(2) : 12–18.

Ai 辅助翻译