

**UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB – BLIDA 1**

Faculté des Sciences  
Département d'Informatique



## **Mémoire de Master**

Spécialité : Sécurité des Systèmes d'Informations

# **Système de Passeport Digital pour les œuvres artistiques basé sur la Blockchain**

**Présenté par :**

Gueboudj Abdesalem  
Kouider Ben Ali Mohamed Riad

**Membres du jury :**

Présidente : Dr. Abed Hafidha  
Examinatrice : Dr. Daoud Hayet  
Promotrice : Dr. Bacha Siham

**Année universitaire : 2024 – 2025**

# Remerciements

---

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien cette modeste réalisation.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre promotrice, Dr. BACHA Siham, pour sa confiance, son accompagnement tout au long de ce travail, ainsi que pour ses conseils pertinents et son soutien constant. Sa disponibilité et son expertise ont été précieuses dans l'aboutissement de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Mr. Karim Sargoua, artiste et enseignant à l'École Supérieure des Beaux-Arts, pour les informations précieuses qu'il nous a fournies sur le domaine de l'art et pour sa disponibilité. Nous remercions également nos collègues et amis, notamment les membres de GROVE St, pour leur support, leur esprit d'équipe et leur soutien tout au long de ce parcours.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques enrichissantes.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignant et administratif de l'Université de Blida, dont l'engagement et le professionnalisme ont contribué à la qualité de notre formation et à la réussite de notre parcours académique.

# Dédicace

---

Je dédie ce modeste travail à :

À la mémoire de **mon cher père** , que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis. Son souvenir reste gravé dans mon cœur et m'inspire chaque jour.

À **ma mère**, pour son amour inconditionnel, sa patience infinie, ses prières constantes et ses sacrifices quotidiens. Qu'Allah la protège et lui accorde santé et bonheur.

À **ma petite sœur**, pour sa présence douce, son affection sincère et ses encouragements silencieux mais toujours présents.

À mon binôme, **Abdesalem**, pour sa collaboration, son sérieux et son esprit d'équipe tout au long de cette aventure. Merci pour ton engagement et ton soutien dans chaque étape de ce projet.

À mes amis proches : **Yacine ,Ihab ,Hamid ,Wadoud ,Moncef ,Wassim ,Khaled ,Mohamed , Islam et Aziz**, Merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements, et les moments de réconfort partagés, surtout dans les périodes les plus difficiles de ce parcours. Votre amitié a été précieuse pour moi.

Je vous exprime à tous ma gratitude profonde et vous rends hommage à travers ce travail.

# Dédicace

---

Avec toute ma gratitude, je dédie ce travail :

À **mon cher père** et **ma chère mère**, qui ont toujours été mon pilier, mon refuge et ma source d'inspiration, par leur amour inconditionnel, leurs prières sincères et leurs innombrables sacrifices. **Je prie Dieu de les préserver, de leur accorder santé, bien-être et longue vie.**

À mon frère **Omar Abderahmane** et **mes deux sœurs**, pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur présence chaleureuse qui m'ont donné la force d'avancer.

À toute la famille : **Gueboudj** et **Zenibaa**, pour leur amour, leur fierté et leur accompagnement tout au long de mon parcours.

À mon cousin **Djamel**, pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants, qui ont eu un impact profond sur ma réussite.

À mes loyaux : **Ghano, Abdelhake, Yassine, Salim, Rida, Yakoub**, ainsi qu'à tout le groupe **JNB**, mes frères de toujours, pour votre loyauté, votre énergie et les souvenirs indélébiles.

À tout membre de GROVE St : **Riad, Hamid, Moncef, Ihab**, et sans oublier les formidables **Wadoud** et **Khaled**, pour les moments partagés, l'amitié sincère et les souvenirs gravés dans le cœur.

# Résumé

---

Face à la domination des plateformes numériques étrangères et au manque d'outils structurés pour les artistes algériens, notre plate-forme propose une solution fondée sur un passeport numérique certifié par blockchain, cœur technologique de la plateforme. Ce passeport agit comme une carte d'identité numérique unique et infalsifiable pour chaque œuvre, enregistrant son empreinte cryptographique (hash), sa provenance, les certificats d'authenticité signés, son historique d'expositions et ses droits d'auteur. La blockchain, en tant que registre décentralisé et immuable, garantit l'intégrité et la sécurité totale de ce passeport : elle rend les données inviolables et toute modification détectable, assure une traçabilité complète et transparente de la vie de l'œuvre (propriété, transactions, prêts), et valide l'authenticité via des signatures cryptographiques ancrées. Cette combinaison technologie crée une infrastructure de confiance, permettant aux artistes de prouver leur paternité et protéger leurs droits, offrant aux collectionneurs et galeries une preuve d'authenticité et une traçabilité irréfutables pour les acquisitions, et préservant ainsi la valeur et le rayonnement du patrimoine artistique algérien dans un espace numérique sécurisé.

**Mots-clés :** Blockchain, passeport numérique, plateforme artistique nationale, valorisation du patrimoine, traçabilité des œuvres, artistes algériens.

# Abstract

---

Faced with the dominance of foreign digital platforms and the lack of structured tools for Algerian artists, our platform offers a solution based on a digital passport certified by blockchain, the technological heart of the platform. This passport acts as a unique and tamper-proof digital identity card for each work, recording its cryptographic fingerprint (hash), its provenance, signed certificates of authenticity, its exhibition history and its copyright. The blockchain, as a decentralized and immutable register, guarantees the integrity and total security of this passport : it makes the data inviolable and any modification detectable, ensures complete and transparent traceability of the life of the work (ownership, transactions, loans), and validates authenticity via anchored cryptographic signatures. This technological combination creates a trusted infrastructure, allowing artists to prove their authorship and protect their rights, offering collectors and galleries irrefutable proof of authenticity and traceability for acquisitions, and thus preserving the value and influence of Algerian artistic heritage in a secure digital space.

**Keywords :** National artistic platform, heritage promotion, digital passport, traceability of works, Algerian artists, blockchain.

## ملخص

---

في ظل هيمنة المنصات الرقمية الأجنبية ونقص الأدوات المنظمة للفنانين الجزائريين، تقدم منصتنا حلاً قائماً على جواز سفر رقمي معتمد بتقنية بلوكتشين، القلب التكنولوجي للمنصة. يعمل هذا الجواز كبطاقة هوية رقمية فريدة ومضادة للتلاعب لكل عمل فني، مسجلاً بصمته المشفرة (الهاش)، ومصدره، وشهادات الأصالة الموقعة، وتاريخ عرضه، وحقوق نشره. تضمن تقنية بلوكتشين، باعتبارها سجلاً لامركزياً ثابتاً، سلامة هذا الجواز وأمانه التام: فهي تجعل البيانات غير قابلة للانتهاك، وأي تعديل قابل للكشف، وتضمن تتبعاً كاملاً وشفافاً لحياة العمل الفني (الملكية، والمعاملات، والقروض)، وتتحقق من صحته عبر توقعات تشفيرية ثابتة. يخلق هذا المزيج التكنولوجي بنية تحتية موثوقة، تسمح للفنانين بإثبات ملكيتهم وحماية حقوقهم، مقدمة لهواة الجمع والمعارض الفنية دليلاً قاطعاً على الأصالة وإمكانية تتبع المقتنيات، مما يحافظ على قيمة التراث الفني الجزائري وتأثيره في فضاء رقمي آمن.

الكلمات المفتاحية: منصة فنية وطنية، الترويج للتراث، جواز سفر رقمي، إمكانية تتبع الأعمال، الفنانون الجزائريون، تقنية البلوك تشين.

# Table des matières

<b>Introduction Générale</b>	<b>12</b>
<b>1 État de l'art</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction	13
1.2 Contexte et problématique	13
1.2.1 Manque de traçabilité et d'authenticité des œuvres d'art	14
1.2.2 Risques de falsification et de vol	14
1.2.3 Absence de base de données centralisée pour les œuvres	14
1.2.4 Manque d'accès à la blockchain et à la technologie pour les artistes locaux	15
1.2.5 Enjeux de protection des droits d'auteur dans un cadre numérique	15
1.2.6 Passeport digital de produit	16
1.3 Travaux existants	16
1.3.1 Systèmes basés sur la blockchain	16
1.3.2 Systèmes à base de passeport digitale	19
1.4 Conclusion	20
<b>2 Conception de la solution</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction	21
2.2 Etude de l'existant et définition des besoins	21
2.3 Concepts clés	24
2.3.1 La blockchain	24
2.3.2 Composants clés du fonctionnement d'une blockchain	24
2.3.3 Types de blockchain et exemples	26
2.3.4 Réseau Blockchain	26
2.4 Schéma globale du système	28
2.5 Conception du système	30
2.5.1 Diagramme de cas d'utilisation	30
2.5.2 Diagramme de classe	32
2.5.3 Scénarios de fonctionnement	33
2.6 Conclusion	34
<b>3 Mise en œuvre de la plateforme</b>	<b>35</b>
3.1 Introduction	35
3.2 Environnement et outils de travail	35
3.2.1 Langages de programmation et logiciels	35
3.2.2 Outils utilisé	41
3.3 Implémentation du système	42
3.3.1 Plateforme Web	42

---

3.3.2	Plateforme Mobile . . . . .	44
3.3.3	Intégration Blockchain . . . . .	45
3.3.4	Sécurité et Bonnes Pratiques . . . . .	46
3.4	Interface graphique : . . . . .	48
3.5	Conclusion . . . . .	59
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre Artory et Verisart . . . . .	18
2.1	Résumé des profils utilisateurs et de leurs besoins dans la plateforme . . .	23
2.2	Comparaison des principaux réseaux blockchain . . . . .	27

# Table des figures

2.1	Schéma global du systeme . . . . .	29
2.2	Diagramme de cas d'utilisation d'un invité . . . . .	30
2.3	Diagramme de cas d'utilisation des utilisateurs . . . . .	31
2.4	Diagramme de classe . . . . .	32
3.1	Logos des outilles utilisées . . . . .	40
3.2	Page d'accueil . . . . .	48
3.3	Étapes du processus d'inscription mobile . . . . .	50
3.4	Étapes du processus d'inscription web . . . . .	51
3.5	Collection . . . . .	52
3.6	Création d'un NFT par un artiste dans l'application web . . . . .	53
3.7	Étapes de création d'un NFT par un artiste dans l'application mobile . . . . .	54
3.8	NFT associer a une étiquette NFC . . . . .	55
3.9	Transfert d'un NFT . . . . .	56
3.10	Historique de transfert d'application mobile . . . . .	57
3.11	Historique de transfert d'application web . . . . .	57
3.12	Passport digitale d'une œuvre. . . . .	58

# Introduction Générale

Dans un monde où les technologies numériques redéfinissent en profondeur les pratiques artistiques, la gestion des œuvres d'art évolue à un rythme sans précédent. La montée en puissance du numérique, des objets connectés et des actifs virtuels pousse le marché de l'art à repenser ses méthodes de certification, de traçabilité et de protection des droits. Entre falsifications, opacité des transactions, et difficulté à prouver la provenance d'une œuvre, les acteurs du marché se heurtent à des enjeux critiques qui compromettent la confiance et la transparence dans le secteur.

Face à ces défis, la technologie blockchain s'impose comme une solution innovante et robuste. Grâce à ses caractéristiques — immutabilité, transparence, sécurité cryptographique et décentralisation — elle permet de créer un passeport digital unique pour chaque œuvre d'art. Ce passeport prend la forme d'un NFT (Non-Fungible Token), représentant une identité numérique infalsifiable, contenant toutes les informations essentielles liées à l'œuvre : son créateur, sa date de création, sa provenance, ses transactions passées, et d'éventuels certificats d'authenticité.

Mais pour garantir une réelle connexion entre le monde numérique et le monde physique, ce système ne peut reposer uniquement sur des données virtuelles. C'est pourquoi chaque NFT est lié à un identifiant physique unique, intégré à l'œuvre elle-même via une puce NFC (Near Field Communication). Cette puce, discrètement installée sur l'œuvre, permet de scanner l'objet pour accéder instantanément à son passeport digital enregistré sur la blockchain. Ainsi, le lien entre l'œuvre matérielle et son jumeau numérique est sécurisé, vérifiable et infalsifiable.

Notre objectif est d'explorer la conception, les enjeux et la mise en œuvre d'un système de passeport digital basé sur la blockchain et couplé à la technologie NFC, dédié à l'authentification et à la traçabilité des œuvres d'art. Nous analyserons les fondements technologiques de la blockchain et des NFT, la manière dont les puces NFC peuvent être intégrées dans les œuvres sans les altérer, et les impacts juridiques, éthiques et économiques d'un tel dispositif.

À travers une approche mêlant recherche théorique, analyse des cas d'usage existants, et proposition d'un prototype fonctionnel, ce travail ambitionne de démontrer comment la synergie entre NFTs et NFC peut révolutionner la gestion des œuvres d'art. Ce système hybride apporte une solution concrète aux problématiques d'authenticité et de traçabilité, tout en ouvrant la voie à une nouvelle ère de valorisation, de protection et de transmission du patrimoine artistique.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres principaux :

- **Chapitre 1 – État de l'art** : Ce chapitre introduit le contexte général de notre sujet, en mettant en lumière les problématiques actuelles liées à l'authenticité et à la traçabilité dans le monde de l'art. Il expose les enjeux auxquels sont confrontés les artistes, les collectionneurs et les institutions, avant de présenter les technologies émergentes — telles que la blockchain, les NFTs, les portefeuilles numériques, ou encore les puces NFC — ainsi que les travaux existants et solutions déjà proposées dans ce domaine.
- **Chapitre 2 – Conception de la solution** : Ce chapitre définit en détail les besoins fonctionnels et techniques du système à concevoir. Il commence par une étude sur des différents acteurs du système, leur besoins ainsi que leurs rôles respectifs et

leurs interactions avec la plateforme.

Nous avons également introduit la technologie blockchain, en expliquant ses concepts fondamentaux tels que les blocs, les transactions, le mécanisme de consensus, et les types de réseaux (publics, privés, hybrides). Cette partie nous a permis de justifier notre choix du réseau blockchain le plus adapté au contexte du projet, en tenant compte des critères de transparence, de sécurité, de coût et de scalabilité.

Un schéma global est ensuite proposé pour donner une vue d'ensemble de l'architecture du système. Enfin, le chapitre se termine par une modélisation formelle de la solution à l'aide de diagrammes UML (cas d'utilisation, classes et séquences), permettant de structurer les composants du projet et de préparer la phase d'implémentation.

- **Chapitre 3 – Mise en œuvre de la plateforme :** Ce dernier chapitre détaille les choix technologiques, le développement du prototype, et l'intégration des différents composants du système. Il met en évidence les étapes concrètes de la mise en œuvre de la solution, notamment l'enregistrement des NFTs sur la blockchain, l'intégration des puces NFC, et l'interfaçage utilisateur.

# CHAPITRE 1

## État de l'art

---

### 1.1 Introduction

Ce chapitre vise à poser les bases théoriques et techniques de notre sujet. Avant de développer une solution de traçabilité et d'authentification des œuvres d'art via la blockchain, les NFT et la puce NFC, il est essentiel de bien comprendre les problématiques actuelles du domaine et les solutions proposées précédemment. Nous présenterons d'abord le contexte général dans lequel s'inscrit notre projet, en soulignant les principaux obstacles auxquels sont confrontés les artistes, les collectionneurs et les institutions : manque de traçabilité, falsification, manque de base de données fiable, difficulté d'accès aux nouvelles technologies et sauvegarde des droits d'auteur dans un monde numérique en mutation. Ensuite, nous analyserons les travaux existants, notamment deux solutions connues dans ce secteur : Artory et Verisart. Nous allons comparer leurs approches, leurs limites, et ce qu'elles peuvent nous inspirer pour construire notre propre solution. Nous aborderons aussi la notion de passeport digital, qui est au cœur de notre projet. Ce chapitre nous donnera donc la possibilité d'identifier de manière plus précise les enjeux actuels et les indications d'amélioration potentielles, afin de justifier les décisions techniques et fonctionnelles que nous mettrons en place ensuite.

### 1.2 Contexte et problématique

L'art, en tant que média de mémoire collective et d'identité culturelle, est au centre de la sauvegarde et de l'édification du patrimoine national immatériel. C'est sur la même logique qu'en Algérie qu'en grande majorité des autres pays : les œuvres artistiques, traditionnelles aussi bien qu'actuelles, sont confrontées à d'importants problèmes concernant leur valorisation, leur protection, leur promotion. L'un des principaux problèmes est le manque d'outils fiables pour garantir la traçabilité et l'authentification. Car les œuvres d'art s'échangent de manière incertaine, ce qui rend difficile la confiance en elles et affaiblit leur valeur sur les marchés de l'art locaux et mondiaux. De plus, ce manque de traçabilité rend plus difficile la preuve de la propriété, de l'authenticité de l'œuvre, voire de la reconnaissance des droits du créateur. Parallèlement, le risque de vol, de falsification ou de perte de données historiques a laissé des œuvres matérielles, parfois enregistrées dans un environnement réel, sans inventaire numérique et aucun fonds de données. Ce

phénomène rend également l'accès aux ressources du patrimoine inégal, notamment pour les jeunes artistes ou les chercheurs. L'émergence de technologies décentralisées comme la blockchain offre également de nouvelles solutions potentielles pour combler ces lacunes. Grâce à sa transparence et à son indestructibilité, la blockchain garantit la provenance, la traçabilité et l'historique des œuvres d'art de manière vérifiable et sécurisée. Associée aux passeports numériques, cette technologie a le potentiel de révolutionner l'enregistrement, la vente et la préservation des œuvres d'art.

### **1.2.1 Manque de traçabilité et d'authenticité des œuvres d'art**

La traçabilité et l'authenticité des œuvres d'art constituent un véritable enjeu dans le domaine de la culture, notamment dans le cas de l'Algérie où les mécanismes de certification font défaut. De nombreux artistes, collectionneurs et institutions culturelles luttent pour garantir l'origine et l'authenticité des pièces qu'ils présentent ou vendent. Un échec d'un système garantissant une traçabilité sécurisée de l'historique de propriété, des transactions ou des restaurations d'une œuvre ouvre les portes aux activités de fraude telles que les falsifications, les vols ou les reproductions non autorisées. Cet excès de traçabilité ne dégrade pas seulement la confiance dans le marché de l'art mais impose également un préjudice à l'appréciation du patrimoine artistique algérien au niveau national et international. Dans un environnement où les certificats d'authenticité sont facilement falsifiables, une réponse technologique doit être adoptée. La blockchain, en raison de sa possibilité d'enregistrer des données de manière décentralisée, immuable et transparente, constitue une voie prometteuse pour compenser ces défauts et attester de l'origine des œuvres d'art.

### **1.2.2 Risques de falsification et de vol**

Le marché de l'art est durement touché par des menaces récurrentes de fraude et d'appropriation, qui gravent la mauvaise réputation entre créateurs, marchands, établissements et acheteurs. L'œuvre d'art, et souvent particulièrement une pièce patrimoniale ou visuelle, est facile à copier, voire modifier sans que l'on ne puisse pas détecter au premier chef une contrefaçon, d'autant moins en la privation du certificat d'authenticité délivré sûr et d'un fichier numérique sécurisé en valeur. En Algérie, comme en beaucoup d'autres pays en voie de développement, les installations de conservation, d'entreposage et de sécurisation des œuvres sont d'habitude insuffisantes, contribuant aux pillages dans les musées, les galeries ou en voies de transport. En plus, la carence de coordination entre les pouvoirs culturels et les institutions judiciaires rend affermi l'obstacle à la restitution des œuvres volées ou à l'engagement des faussaires.

### **1.2.3 Absence de base de données centralisée pour les œuvres**

L'absence d'une base de données centralisée réservée aux œuvres d'art constitue un principal handicap à la gestion, à la valorisation et à la conservation du patrimoine artistique, en particulier en Algérie. Les données relatives aux œuvres – leur auteur, leur provenance, leur statut juridique ou leur localisation – sont de ce fait souvent décalées entre institutions (musées, galeries, ministères, collectionneurs privés), inscrites sur des supports physiques ou des systèmes informatiques non transmis. Cette fragmentation rend extrêmement difficile l'accès à une vision globale du patrimoine artistique national. Cela rend également difficile l'identification rapide d'une œuvre en cas de litige, de vente ou

de tentative de restitution. De plus, sans un registre numérique fiable et partagé, les efforts de numérisation ou de promotion internationale sont divisés et inefficaces. L'intégration d'une solution décentralisée basée sur la blockchain pourrait pallier cette lacune. En permettant à chaque œuvre d'être enregistrée dans un registre numérique accessible et sécurisé, une telle technologie garantirait la transparence, la cohérence et l'intégrité des informations. Elle offrirait ainsi une base de données partagée entre les différents acteurs du secteur culturel et faciliterait la collaboration, la traçabilité et la conservation à long terme.

#### **1.2.4 Manque d'accès à la blockchain et à la technologie pour les artistes locaux**

Un des freins majeurs pour les artistes locaux, et à ce titre en Algérie, est le manque d'accès à des technologies innovantes comme la blockchain, qui pourrait les aider à gérer leur portefeuille de créations et à assurer la provenance de leurs œuvres. Si de plus en plus de personnes militent pour que la blockchain devienne un outil de gestion des droits d'auteur et de sécurisation des œuvres d'art, force est de constater que la technologie en est encore à ses balbutiements et reste peu accessible, notamment dans les pays du Sud où les infrastructures et les compétences techniques font défaut. Un grand nombre d'artistes locaux sont dépourvus à la fois de la formation nécessaire pour bien comprendre ou exploiter la blockchain, mais aussi de toute ressource pour investir dans cette technologie, qui les soumet au risque de pratiques qui ne garantissent pas leur protection et qui peuvent aboutir à des vols de propriété intellectuelle. Non seulement il n'existe pas de plateforme accessible ou de format d'adoption en fonction de leur réalité mais en plus, les générations de coûts : frais de transfert, garde, dupliquent au détriment des artistes débutants. Les solutions mises en œuvre sont par ailleurs trop complexes pour les artisans locaux et entretemps ne leur laissent pas l'accès aux bénéfices escomptés. Les initiatives locales en termes de formation, de partenariat avec des plateformes de blockchain, départementales, régionales, nationales, etc. ; se montrent forcément inévitables pour aider les artistes, à surmonter la méfiance, à être mieux informés des outils et de leurs applications, ou à repenser avec leur aide, le cadre de leur formatisation artistique. Ce qui pourrait favoriser alors l'appropriation de la blockchain au bénéfice de la préservation et de la valorisation, dans un marché mondialisé de leurs œuvres.

#### **1.2.5 Enjeux de protection des droits d'auteur dans un cadre numérique**

L'irruption du numérique a bouleversé la production, la diffusion et la consommation des œuvres d'art, apportant à la fois des opportunités et une grande complexité dans la protection des droits d'auteur. L'Algérie, tout comme tant d'autres pays, a pu constater une vulnérabilité accrue de la création artistique suite à la numérisation, inédite sur la scène internationale, à travers la diffusion débridée des œuvres, en dehors du contrôle de son auteur, à travers le recours aux pratiques de contrefaçon, de plagiat et de diffusion non autorisée. Reproduire en numérique des œuvres (images, vidéos, sculptures numérisées, etc.) fait que leur réplique est immédiatement possible et que leur diffusion à l'échelle internationale est irréversible, le tout sans pouvoir parfois remonter à leur origine et surtout à son usage. Dès lors, la protection des droits d'auteur apparaît plus complexe dans les rapports entre auteur et éditeur, l'auteur, se voyant privé des outils lui permettant de

protéger de manière efficace son œuvre. Les supports de protection antérieurs (certificats d'authenticité, contrat physique) se révèlent bien malaisés dans l'univers numérique. Les artistes et créateurs assistent, impuissants, à la piraterie de leurs œuvres en ligne et de leur mise à disposition sur les plateformes de partage illégales. La blockchain constitue une solution originale pour répondre à ces enjeux, car elle permet d'enregistrer une œuvre et ses droits d'auteur dans un registre que l'on ne peut ni altérer, ni manipuler, ni falsifier. De cette façon, chaque œuvre pourra être rattachée à son créateur grâce à un contrat intelligent (smart contract), une sorte d'écrit prenant la forme d'un code exécutable sur le réseau, qui définit droits et obligations en lien avec l'exploitation de l'œuvre. Par conséquent, les créateurs peuvent protéger leurs œuvres mais également contrôler leurs usages, les licences accordées et les recettes générées.

### 1.2.6 Passeport digital de produit

Le Digital Product Passport (DPP) représente un dossier numérique regroupant les informations essentielles relatives à un produit, pendant toute la durée de son cycle de vie (caractéristique, provenance, réparabilité, recyclabilité, ...). Il constitue un dispositif de transparence, de traçabilité et de durabilité, dans une volonté de lutte contre la contrefaçon, le plagiat et la fraude. Initié par l'Union européenne dans le cadre du règlement relatif à l'écoconception des produits durables (ESPR) [29], le DPP a pour objectif de favoriser l'économie circulaire. Il fait également l'objet d'une expérimentation au Québec pour renforcer la compétitivité à l'exportation [10].

Le DPP est déjà appliqué à plusieurs domaines :

- **Textile** : pour améliorer la circularité dans l'industrie de la mode [45].
- **Batteries** : avec des obligations de traçabilité dès 2026 [46].
- **Dispositifs biomédicaux** : pour renforcer la sécurité et la transparence [47].

Dans le contexte algérien, le DPP peut jouer un rôle clé dans la protection du patrimoine culturel. Le plagiat artistique constitue un problème majeur, et des initiatives comme Moubadra Art tentent d'y remédier [24]. Appliquer le DPP au domaine culturel permettrait de garantir l'authenticité des œuvres, protéger les droits d'auteur et valoriser la création locale.

**En résumé**, le DPP est une solution innovante et adaptable, déjà adoptée à l'international, qui peut répondre efficacement aux enjeux spécifiques du secteur culturel en Algérie.

## 1.3 Travaux existants

Pour pallier aux problèmes cités précédemment, plusieurs solutions ont été proposées. Nous distinguons deux catégories principales : systèmes à base de blockchain et systèmes à base de passeport digitale. Nous détaillons les concepts relatifs à ces systèmes dans ce qui suit.

### 1.3.1 Systèmes basés sur la blockchain

La naissance de la technologie reposant sur la blockchain a suscité la mise en place de nombreuses plateformes spécialisées dans la gestion, la commercialisation et l'authentification d'œuvres d'art numériques. Plus précisément, ces plateformes permettent à des

artistes, marchands, collectionneurs ou institutions de sécuriser les informations relatives aux œuvres (authenticité, provenance, propriété), de réaliser automatiquement des transactions les engageant via des contrats intelligents et de vérifier que la traçabilité est assurée, grâce à la blockchain. Ont ainsi été mises en place un certain nombre de plateformes, parmi lesquelles :

### **Artory**

Artory<sup>1</sup> est une plateforme internationale qui fait appel à la blockchain pour établir un registre de sécurité pour les œuvres d'art. Elle collabore avec des institutions artistiques aussi bien qu'avec des galeries et maisons de vente pour authentifier l'origine et l'historique des œuvres. Chaque transaction enregistrée est immuable, ce qui favorise la confiance entre acheteurs et vendeurs. Artory est fondée sur une logique B2B, structurellement dédiée à la transparence du marché.

### **Verisart**

Verisart<sup>2</sup> est un service Web3 qui a vu le jour en 2015 et qui a pour vocation d'aider les artistes et créateurs à faire authentifier, créer et vendre leurs œuvres numériques et physiques sur la blockchain. Il propose des certificats d'authenticité à la propriété protégée (CPOs) pour assurer le paysage. Les utilisateurs de Verisart peuvent créer des NFTs sur Ethereum, Polygon et Base, tout en ayant le choix de mint ou non leurs œuvres. La solution s'interface avec des solutions e-commerce comme Shopify ou WooCommerce pour diffuser leurs œuvres et mettre en avant des contenus exclusifs à leurs clients. Autre atout, elle permet d'associer les œuvres physiques à leur certificat digital via des étiquettes NFC ou QR, tout comme de valider les identités des créateurs.

### **Comparaison entre Artory et Verisart**

Voici une comparaison claire et structurée entre Artory et Verisart, deux plateformes utilisant la blockchain dans le domaine de l'art :

---

<sup>1</sup>Plateforme Artory : <https://www.artory.com/>, consulté le 14 juin 2025

<sup>2</sup>Plateforme Verisart : <https://verisart.com/>, consulté le 14 juin 2025

<b>Objectif principal</b>		
<b>Critère</b>	<b>Artory</b>	<b>Verisart</b>
Finalité	Créer un registre sécurisé pour l'historique et la provenance des œuvres d'art.	Aider les créateurs à authentifier, créer et vendre leurs œuvres numériques et physiques.
Approche	B2B (institutions, galeries, maisons de vente).	B2C & C2C (créateurs individuels, artistes, vendeurs en ligne).
<b>Technologie et fonctionnalités</b>		
<b>Critère</b>	<b>Artory</b>	<b>Verisart</b>
Blockchain	Utilise la blockchain pour garantir l'immutabilité des transactions liées aux œuvres.	Permet la création de NFTs sur Ethereum, Polygon, Base.
Certificats	Met en avant la traçabilité de provenance via un registre immuable.	Propose des Certificats de Propriété Protégés (CPOs) et d'authenticité.
Association physique-digitale	Non mentionné spécifiquement.	Oui, via NFC/QR codes pour relier l'œuvre physique au certificat digital.
<b>Utilisateurs cibles</b>		
<b>Critère</b>	<b>Artory</b>	<b>Verisart</b>
Public cible	Professionnels de l'art : galeries, musées, experts.	Artistes indépendants, créateurs, e-commerçants.
Accessibilité	Moins orienté vers le grand public.	Accessible via Shopify, WooCommerce, etc. pour vendre facilement.
<b>Autres points distinctifs</b>		
<b>Critère</b>	<b>Artory</b>	<b>Verisart</b>
Transparence du marché	Vise à renforcer la confiance sur le marché de l'art traditionnel.	Vise à autonomiser les créateurs dans le Web3, avec une approche plus décentralisée et directe.
Minting	Non applicable ou pas mis en avant.	L'utilisateur peut choisir de mint ou non son œuvre (flexibilité).
Date de création	Non précisée, mais récente.	Fondée en 2015, donc pionnière dans le domaine.

TAB. 1.1 – Comparaison entre Artory et Verisart

Comparer Artory et Verisart, c'est un peu comme comparer une authentification et une licence sur des produits d'occasion. Artory s'affirme comme un poids lourd de la technologie blockchain dans le marché de l'art « traditionnel » en misant sur son catalogue d'œuvres d'art et sa côte d'usage pour sécuriser et retracer l'historique des données

importantes sur les œuvres, dans un environnement B2B. D'un côté, Verisart est plus axé sur une approche ouverte et web3 qui cherche à démocratiser les échanges en proposant à des artistes des technologies similaires à celles du marché de l'art (NFT, Cert, ...) pour des galeries ou des artistes mais dans un environnement grand public (B2C , C2C).

### 1.3.2 Systèmes à base de passeport digitale

Les systèmes de passeport numérique, en anglais Digital Product Passports, ou DPP, désignent des dispositifs numériques permettant de stocker et transmettre des informations essentielles de la part des produits au long de leur cycle de vie. Le DPP est déjà mis en œuvre dans plusieurs secteurs industriels. Dans le secteur textile il contribue à la traçabilité de l'origine des matériaux tout en permettant de favoriser l'économie circulaire. Le groupe H&M a lancé un projet de déploiement d'identifiants numériques sur ses produits, en démarrant par la collection Men's Essentials, pour recenser les informations essentielles de chaque article. En scannant un QR code, le consommateur va pouvoir découvrir de nombreuses informations relatives à son vêtement, mais aussi des services qui lui permettraient de l'entretenir, de le revendre ou de le recycler, et ainsi prolonger le cycle de vie du produit. Cette initiative s'inscrit dans une politique générale de numérisation de toutes les marques et collections du groupe [12]. Un autre exemple, l'industrie des batteries, il devient obligatoire à partir de 2026 pour assurer la traçabilité des composants et encourager le recyclage. Des acteurs comme Everledger développent déjà des solutions de passeport numérique basées sur la blockchain, permettant de relier chaque batterie et ses composants critiques à une identité numérique. Cette technologie facilite l'échange sécurisé de données entre les parties prenantes tout au long du cycle de vie, afin de favoriser une chaîne de valeur durable pour les batteries de véhicules électriques et d'appareils électroniques [17].

S'ils sont utilisés principalement dans l'industrie, un accroissement d'intérêt pour leur application dans le secteur culturel se développe, pour l'authentification comme pour la traçabilité et la gestion des œuvres.

Un DPP, en milieu artistique, peut être associé aux différentes œuvres d'art afin d'assurer la transparence sur l'origine de ces œuvres . Parmi les informations qu'un DPP peut présenter sur une œuvre, nous trouvons :

- Le nom de l'artiste
- La date de création
- Les matériaux utilisés
- Les certificats d'authenticité
- Les changements de propriété

En s'associant à un NFT ou à un registre blockchain, ce passeport numérique devient immuable, vérifiable et consultable à tout moment. Il assure l'authenticité de l'œuvre et limite dramatiquement les difficultés de falsification, de vol ou de disparition d'informations. Des projets se dessinent dans ce sens. C'est notamment le cas de :

- **Ariane** : Ariane<sup>3</sup> travaille sur des DPP pour objets de luxe, avec un accent sur la souveraineté des données.

---

<sup>3</sup>Ariane : <https://www.arianee.com/>, consulté le 14 juin 2025

- **Museum in a Box** : Museum in a Box<sup>4</sup> explore la documentation numérique pour des objets culturels, notamment pour les musées éducatifs.

Ces systèmes peuvent aussi être liés à des QR codes ou puces NFC, apposés directement sur l'œuvre ou son support, afin de permettre à n'importe quel spectateur, acheteur ou expert de consulter les données du DPP via un simple scan. L'introduction du passeport numérique dans le domaine de l'art constitue ainsi un progrès significatif en faveur de la valorisation du patrimoine culturel, de la mise en œuvre des droits d'auteur et de la construction de marchés plus transparents. Dans un écosystème blockchain, il offre des garanties technologiques importantes et une interopérabilité avec d'autres plateformes ou institutions.

## 1.4 Conclusion

Cette analyse de l'état de l'art a donné une vue d'ensemble sur les difficultés majeures confrontées dans le secteur artistique, notamment dans les pays MENA, dont l'Algérie, en matière de traçabilité, d'authenticité, de droits d'auteur et d'accès aux technologies. Le manque de systèmes fiables de documentation et de protection des œuvres, la grande difficulté d'un système de base de données centralisée, ainsi que le risque de falsification ou de vol bloquent sérieusement la valorisation du patrimoine artistique local. Parallèlement, des avancées technologiques, telles que la blockchain et les passeports numériques, sont autant d'apports techniques et innovants pour répondre à ces problématiques. Des plateformes internationales telles qu'Artory ou Versiart ouvrent la voie à un écosystème artistique plus transparent, sécurisé et équitable. Les DPP permettent d'authentifier l'œuvre, mais aussi d'asseoir la confiance entre artistes, collectionneurs et institutions. Même si ces technologies sont encore peu répandues dans les pays africains et de la région MENA, des projets émergents témoignent d'une volonté de transformation numérique et de reconquête du patrimoine culturel par des moyens décentralisés. En conséquence, les DPP sur blockchain peuvent être considérés comme une opportunité d'investissement pour les artistes et les institutions culturelles des Suds à la condition d'assumer le défaut d'accès à la technologie, la vocation à sensibiliser tous les acteurs concernés, et à développer des solutions intégrant les caractéristiques culturelles qui déterminent chaque région. C'est pour cela que nous proposons à travers ce travail la conception d'un mécanisme hybride sous la forme d'un passeport digital de produit (DPP) utilisant la technologie de la blockchain. Ce mécanisme cherche à répondre aux besoins du marché local, en particulier en Algérie, en apportant une solution technologique de bout en bout aux besoins d'authentification, de traçabilité, et de protection des objets d'art. Elle permet non seulement de fiabiliser les transactions et de renforcer la confiance dans les informations liées aux objets d'art, mais aussi de mettre à disposition des artistes, des acteurs culturels et des collectionneurs un dispositif numérique accessible et lisible, transparent, décentralisé et adapté aux besoins et usages du pays. Par cette contribution, nous souhaitons inscrire notre action dans la dynamique de la promotion de l'art et du patrimoine par la technologie et la souveraineté numérique.

---

<sup>4</sup>Museum in a Box : <https://museuminabox.org/>, consulté le 14 juin 2025

# CHAPITRE 2

## Conception de la solution

---

### 2.1 Introduction

Avant de procéder à la mise en œuvre technique, il est essentiel d'analyser le contexte existant et de définir clairement les besoins fonctionnels et techniques auxquels la solution doit répondre. Ce chapitre est consacré à la conception globale du système, en s'appuyant à la fois sur une étude approfondie des technologies impliquées et sur une modélisation rigoureuse de l'architecture de la plateforme.

Nous commencerons par une étude de l'existant, permettant d'identifier l'ensemble des acteurs dans le système et ces besoins. Ensuite, nous présenterons les concepts clés liés à la blockchain, technologie centrale de notre projet, afin de mieux comprendre son fonctionnement et ses apports dans un contexte de traçabilité et de certification numérique. La suite du chapitre est consacrée à la modélisation du système à travers divers diagrammes (cas d'utilisation, classes, séquence), qui permettent de représenter les interactions, la structure des données et les flux de communication entre les différents composants.

Cette phase de conception constitue une étape fondamentale pour garantir la cohérence, la robustesse et l'évolutivité de la solution à développer.

### 2.2 Etude de l'existant et définition des besoins

L'univers de l'art fait interagir plusieurs types d'acteurs autour des œuvres. Notre plateforme Artia propose une solution numérique qui répond à leurs besoins en matière d'authentification, de traçabilité, et de protection.

#### 1. L'artiste

L'artiste est au cœur du système. Il peut être :

- **Amateur** : Crée par passion, sans volonté commerciale immédiate.
- **Autodidacte** : N'a pas fait d'études artistiques, mais se crée un style propre.
- **Professionnel** : Vit de son art, exposé en galeries ou mis en vente sur des sites Internet.

**Besoins de l'artiste :**

- Protéger la propriété intellectuelle de ses œuvres.
- Fournir une preuve d'authenticité vérifiable.
- Tracer l'historique des ventes et des transferts.
- Identifier le propriétaire actuel de chaque œuvre.
- Valoriser sa carrière grâce à une traçabilité transparente.

## 2. Le collectionneur

Ce profil représente les personnes qui achètent, échangent ou revendent des œuvres.

### **Besoins du collectionneur :**

- Vérifier l'authenticité de l'œuvre avant achat.
- Connaître la liste précédente des propriétaires.
- Prouver la propriété actuelle grâce au certificat numérique (NFT).
- Consulter le profil vérifié de l'artiste.

## 3. Le galeriste

Il propose des expositions et fait le lien entre artistes et acquéreurs.

### **Besoins du galeriste :**

- Avoir des œuvres authentifiées et vérifiées.
- Avoir accès facilement à l'information juridique liée aux œuvres.

## 4. L'administrateur de la plateforme

Il supervise l'activité générale de la plateforme et assure son bon fonctionnement.

### **Besoins de l'administrateur :**

- Gérer les utilisateurs et modérer les contenus.
- Vérifier les profils artistes et valider leurs œuvres.
- Surveiller les transactions et intégrations blockchain (Venly, NFT, wallets, etc.).
- Assurer la sécurité, la fiabilité et la conformité de la plateforme.

<b>Profil</b>	<b>Rôle</b>	<b>Principaux besoins</b>
<b>Artiste</b>	Créateur d'œuvres (amateur, autodidacte, professionnel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protéger la propriété intellectuelle</li> <li>• Garantir l'authenticité</li> <li>• Tracer l'historique des ventes/transferts</li> <li>• Identifier le propriétaire actuel</li> <li>• Valoriser sa carrière par la traçabilité</li> </ul>
<b>Collectionneur</b>	Acheteur, revendeur ou amateur d'art	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier l'authenticité</li> <li>• Connaître les anciens propriétaires</li> <li>• Prouver la propriété via NFT</li> <li>• Consulter le profil de l'artiste</li> </ul>
<b>Galeriste</b>	Intermédiaire entre artistes et acquéreurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accès à des œuvres authentiques</li> <li>• Accès aux informations juridiques</li> </ul>
<b>Administrateur</b>	Supervise la plateforme Artia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gérer utilisateurs et contenus</li> <li>• Vérifier profils et œuvres</li> <li>• Surveiller transactions et blockchain</li> <li>• Garantir sécurité et conformité</li> </ul>

TAB. 2.1 – Résumé des profils utilisateurs et de leurs besoins dans la plateforme

## 2.3 Concepts clés

### 2.3.1 La blockchain

La blockchain est une technologie de registre distribué (*Distributed Ledger Technology* - *DLT*) qui permet de stocker et de transmettre des informations de manière transparente, sécurisée, décentralisée et sans organe de contrôle centralisé. Chaque transaction est regroupée dans un bloc, et chaque bloc est lié cryptographiquement au précédent, formant ainsi une chaîne immuable. Cette structure permet de garantir l'intégrité des données sans intervention d'un tiers de confiance [33].

### 2.3.2 Composants clés du fonctionnement d'une blockchain

#### Transaction :

Action fondamentale sur une blockchain, représentant un transfert de valeur ou d'information. Elle est validée par le réseau avant d'être inscrite dans un bloc [13].

#### Bloc :

Conteneur numérique regroupant un ensemble de transactions. Chaque bloc contient un horodatage, un hash, et le hash du bloc précédent [42].

#### Hash :

Empreinte cryptographique d'une donnée, générée par une fonction de hachage. Elle garantit l'intégrité du contenu [43].

#### Nœud (Node) :

Ordinateur participant au réseau, conservant une copie du registre et pouvant valider les transactions [25].

#### Consensus :

Mécanisme par lequel les nœuds s'accordent sur l'état de la blockchain. Les plus connus sont le *Proof of Work* (PoW) et le *Proof of Stake* (PoS) [13].

- **Proof of Work (PoW)** : Mécanisme de consensus basé sur la résolution de puzzles cryptographiques nécessitant une puissance de calcul importante. Les mineurs s'affrontent pour être les premiers à trouver une solution, ce qui leur confère le droit d'ajouter un bloc à la blockchain. Ce système est utilisé par des blockchains majeures comme Bitcoin et assure la sécurité du réseau, mais au prix d'une forte consommation énergétique et d'un risque de 51 (attack si un acteur malveillant contrôle la majorité de la puissance de calcul) [4, 27].
- **Proof of Stake (PoS)** : Alternative économe en énergie où les validateurs sont sélectionnés en fonction de la quantité de jetons qu'ils ont mis en jeu (stake). Ils peuvent proposer et valider de nouveaux blocs selon une probabilité proportionnelle à leur stake. Ce mécanisme remplace les mineurs par des validateurs et vise à réduire la consommation énergétique tout en conservant la sécurité du réseau – comme dans Ethereum 2.0 ou Cardano [3, 26].

**Adresse :**

Identifiant alphanumérique généré à partir d'une clé publique, utilisé pour recevoir des actifs numériques [7].

**Clé publique / Clé privée :**

Paires cryptographiques assurant la sécurité des transactions. La clé publique permet de recevoir, la clé privée permet de signer et envoyer [5].

**Portefeuille (Wallet) :**

Application ou dispositif physique permettant de gérer des actifs numériques et les clés associées [8].

**Contrat intelligent (Smart Contract) :**

Programme autonome déployé sur la blockchain, s'exécutant automatiquement lorsque des conditions sont remplies [9].

**Jeton (Token) :**

Actif numérique émis sur une blockchain, pouvant représenter une monnaie (fongible) ou un bien unique (non fongible) [6].

**NFT (Jeton non fongible) :**

Jeton unique représentant la propriété d'un bien numérique ou physique. Il contient des métadonnées immuables [15].

**Minting de NFT (émission de jetons non fongibles)**

Le **minting** désigne le processus de création et d'enregistrement initial d'un jeton non fongible (NFT) sur une blockchain. Il consiste à transformer un fichier numérique (image, audio, vidéo) en un actif unique et traçable, en inscrivant ses métadonnées dans un contrat intelligent. Cela comprend notamment :

- L'ajout d'un identifiant (token ID) unique à l'adresse du créateur ;
- L'enregistrement irréversible des métadonnées (titre, auteur, description, URI vers le contenu) sur la blockchain ;
- Le paiement des frais de transaction ("gas") pour valider l'opération.

Ce processus confère au NFT sa propriété, son authenticité et sa capacité à être transféré ou vendu [2].

**Grand livre distribué (Ledger) :**

Registre synchronisé entre tous les nœuds du réseau, stockant toutes les transactions validées [16].

### 2.3.3 Types de blockchain et exemples

Il existe principalement quatre types de blockchains, chacun adapté à des besoins spécifiques en matière de gouvernance, de sécurité et de transparence :

- **Blockchain publique (ex. : Bitcoin, Ethereum)** : Accessible à tous sans autorisation préalable. Elle est totalement décentralisée et transparente.<sup>1</sup>
- **Blockchain privée (ex. : Hyperledger Fabric)** : Gérée par une organisation ou un groupe restreint. L'accès est limité aux participants autorisés.<sup>2</sup>
- **Blockchain consortium ou fédérée (ex. : Quorum)** : Gérée par un groupe d'organisations. Elle combine des aspects des blockchains publiques et privées.<sup>3</sup>
- **Blockchain hybride (ex. : Hedera Hashgraph)** : Combine une blockchain publique et une blockchain privée. Permet de garder certaines données confidentielles tout en assurant la transparence d'autres informations.<sup>4</sup>

Ces principes primaires sont utilisés dans notre projet pour l'architecture de la blockchain. Connaître ces principes est impératif pour la bonne compréhension de la façon dont les œuvres d'art peuvent être sécurisées, authentifiées et poursuivies à l'aide de cette technologie

### 2.3.4 Réseau Blockchain

Plusieurs réseaux blockchain populaires existent, chacun avec ses caractéristiques spécifiques. Le tableau suivant présente une comparaison des principaux réseaux considérés pour notre projet .

---

<sup>1</sup>*Bitcoin* (<https://bitcoin.org>) et *Ethereum* (<https://ethereum.org>) sont deux blockchains publiques ouvertes largement utilisées pour les transactions décentralisées.

<sup>2</sup>*Hyperledger Fabric* (<https://www.hyperledger.org/use/fabric>), développé par IBM, est une blockchain privée souvent utilisée dans des environnements d'entreprise.

<sup>3</sup>*Quorum* (<https://consensys.io/quorum/>) est une blockchain fédérée basée sur Ethereum, conçue pour les institutions financières.

<sup>4</sup>*Hedera Hashgraph* (<https://hedera.com>) est un DLT public à gouvernance fédérée, dirigé par un consortium d'entreprises mondiales.

Réseau	Description officielle	Avantages	Inconvénients
Ethereum	Ethereum est une plateforme décentralisée open source permettant la création de contrats intelligents (smart contracts) et d'applications décentralisées (dApps)[14].	Large écosystème, forte adoption NFT, nombreuses dApps, sécurité éprouvée, grande communauté.	Frais élevés (gas fees), scalabilité limitée, consommation énergétique élevée.
Binance Smart Chain (BSC)	BSC est une blockchain compatible EVM lancée par Binance, optimisée pour la rapidité et les faibles coûts de transaction [1].	Frais faibles, vitesse élevée, compatibilité avec Ethereum, large écosystème DeFi.	Centralisation relative, dépendance à Binance, moins sécurisée que Ethereum.
Tezos	Tezos est une blockchain auto-amendable permettant des mises à jour sans hard forks, utilisant un consensus Proof of Stake [44].	Faible consommation énergétique, gouvernance on-chain, bonne sécurité, frais raisonnables.	Écosystème restreint, adoption NFT moins massive que Ethereum.
Solana	Solana est une blockchain haute performance qui utilise un consensus Proof of History combiné au Proof of Stake [40].	Très haut débit (TPS élevé), frais très faibles, latence faible, adaptée aux applications temps réel.	Centralisation relative, stabilité du réseau parfois affectée par des pannes.
Hedera Hashgraph	Hedera est un réseau public distribué utilisant un algorithme de consensus asynchrone appelé <i>gossip about gossip</i> et un horodatage virtuel, offrant haute performance et sécurité [22].	TPS élevé, finalité rapide, frais très bas, sécurité aBFT, faible consommation énergétique, gouvernance stable.	Gouvernance centralisée par un conseil d'entreprises, écosystème NFT encore jeune.
Polygon	Polygon est une solution de couche 2 pour Ethereum visant à améliorer la scalabilité via des sidechains compatibles EVM [36].	Frais de transaction très bas, haute scalabilité, compatibilité avec Ethereum, large adoption dans l'écosystème DeFi.	Dépendance à Ethereum, complexité de la sécurité liée à la couche 2, centralisation relative.

TAB. 2.2 – Comparaison des principaux réseaux blockchain

**Pourquoi Hedera ?** Hedera Hashgraph a été sélectionné pour ses caractéristiques uniques répondant aux exigences du système :

- **Haute performance** : Hedera offre une capacité de traitement de milliers de transactions par seconde, avec une finalité quasi-instantanée, ce qui est essentiel pour une plateforme interactive à fort trafic.

- **Frais réduits** : Les coûts de transaction sur Hedera sont particulièrement bas (fractions de centimes), rendant viable le minting de NFTs à grande échelle sans coûts prohibitifs.
- **Sécurité** : Son modèle de consensus asynchrone byzantin (aBFT) garantit un haut niveau de résistance aux attaques.
- **Écoresponsabilité** : Hedera est reconnu pour sa faible consommation énergétique comparée à d'autres blockchains comme Ethereum ou Bitcoin.

Malgré ses nombreux avantages, Hedera présente certaines contraintes, telles que sa gouvernance centralisée par un conseil d'entreprises majeures (Google, IBM, etc.) et un écosystème NFT encore en développement comparé à Ethereum ou Polygon.

Cependant, dans le contexte de notre plateforme, Hedera répond au mieux aux besoins spécifiques de la plateforme :

- Minting sécurisé et économique de NFTs représentant les œuvres numériques avec leurs métadonnées.
- Génération et consultation de certificats d'authenticité stockés de façon immuable.
- Suivi des transferts de propriété via des transactions on-chain rapides et fiables.
- Intégration simplifiée et sécurisée via l'API Venly, évitant la gestion directe des clés privées par les utilisateurs.

Ainsi, l'adoption de Hedera Hashgraph permet à notre solution d'assurer traçabilité, authenticité et propriété des œuvres d'art numériques de manière transparente, efficace et durable, tout en respectant les enjeux énergétiques et techniques adaptés au contexte algérien.

## 2.4 Schéma globale du système

Notre système repose sur une architecture globale composée de trois modules principaux :

- Interface utilisateur, qui se compose d'application Web et d'application mobile. L'application mobile communique avec le même API REST que l'application web pour garantir la cohérence des fonctionnalités et des données entre les deux interfaces. Ces applications permettent aux utilisateurs (utilisateurs régulier, collectionneurs, galeristes et artistes) d'interagir avec la plateforme, que ce soit en consultant des œuvres, en scannant des tags NFC ou en déposant du contenu artistique.
- Système centralisé d'accès et de gestion des données, incluant le backend (développé à l'aide du framework Django) et une base de données MySQL. Ce module est responsable de l'authentification, de la gestion des profils utilisateurs, des tâches, des rôles et du suivi des actions effectuées sur la plateforme. Il intègre également une copie des données de blockchain, utilisée comme technique de réduction des coûts et d'optimisation des performances.
- Un système décentralisé basé sur l'API Venly, qui agit comme intermédiaire entre notre plateforme et la **blockchain**<sup>5</sup>. Nous avons conçu une structure flexible permettant de changer facilement de blockchain, tant qu'elle est supportée par Venly. Le module peut créer automatiquement des portefeuilles numériques, générer des NFT pour les œuvres et protéger les informations des œuvres.

<sup>5</sup>Voir la section 3.2.1 pour plus de détails sur l'intégration de la blockchain dans la plateforme.

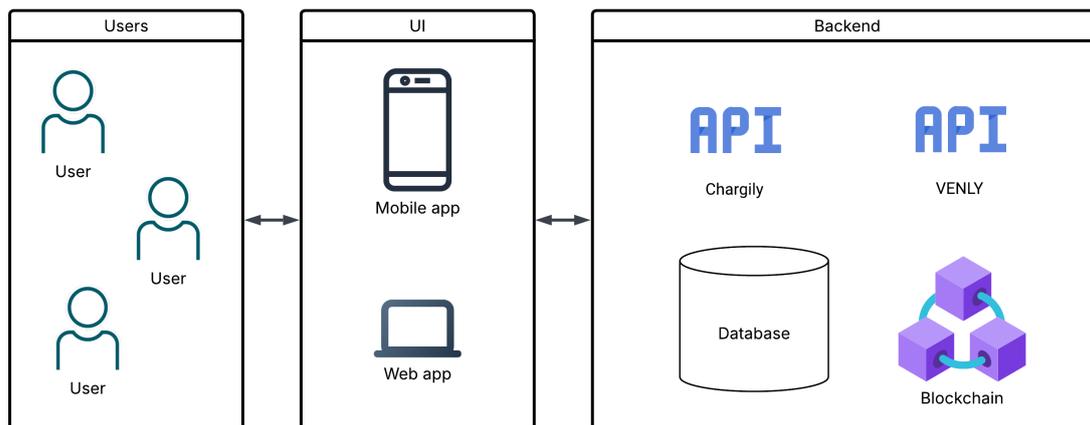


FIG. 2.1 – Schéma global du systeme

## 2.5 Conception du système

### 2.5.1 Diagramme de cas d'utilisation

Les cas d'utilisation représentent un moyen efficace de décrire les fonctionnalités de notre plateforme. Chaque cas d'utilisation décrit une interaction spécifique entre l'utilisateur et le système, et peut être accompagné d'un diagramme de cas d'utilisation pour faciliter la compréhension. Dans notre plateforme, nous avons identifié plusieurs cas d'utilisation que nous avons regroupés dans les diagrammes de cas d'utilisation présentés ci-dessous.

#### Diagramme de cas d'utilisation d'un invité

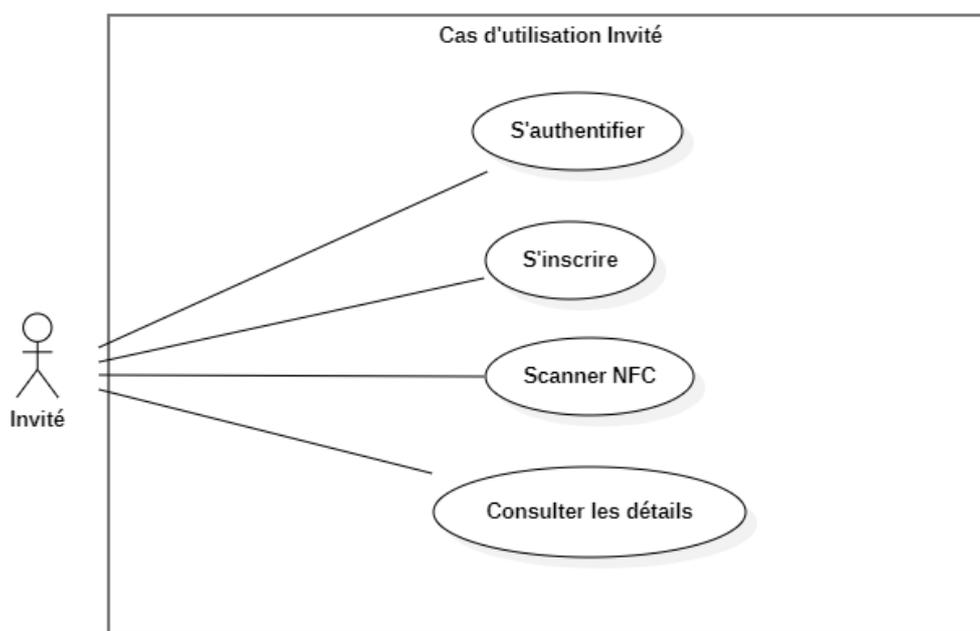


FIG. 2.2 – Diagramme de cas d'utilisation d'un invité

## Diagramme de cas d'utilisation des utilisateurs

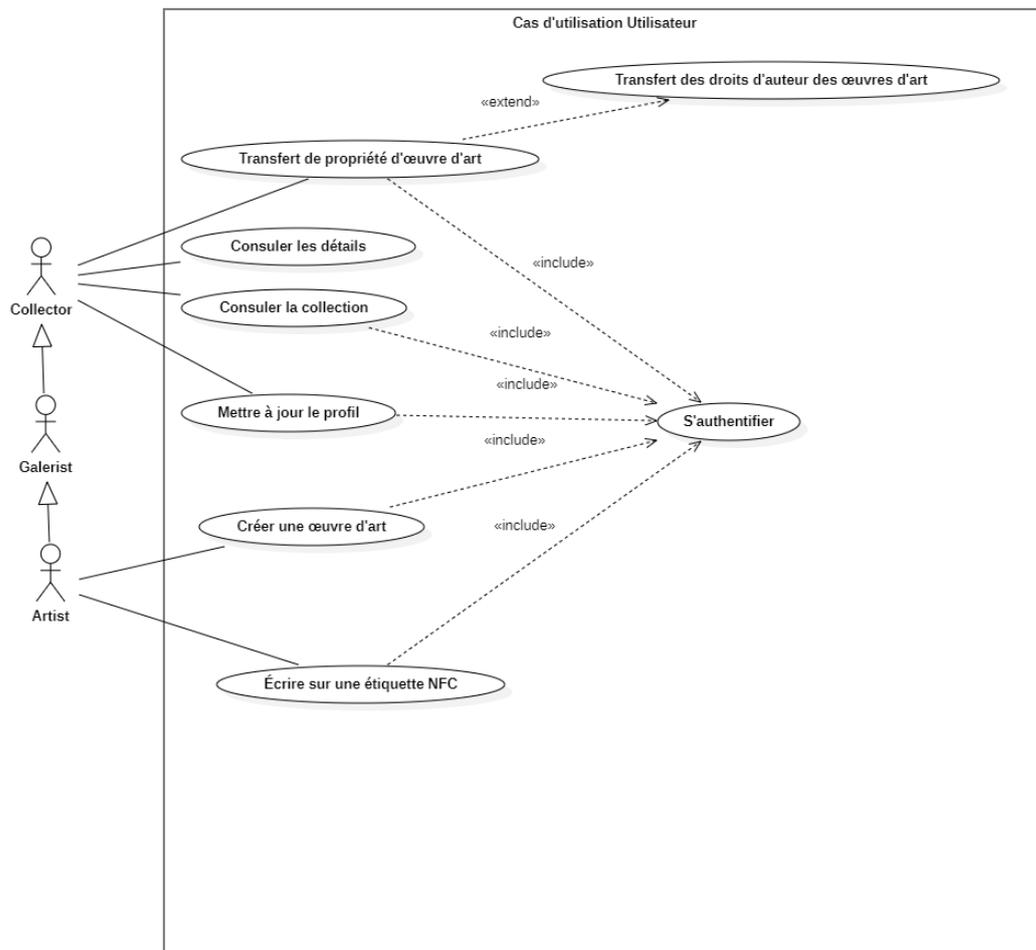


FIG. 2.3 – Diagramme de cas d'utilisation des utilisateurs

## 2.5.2 Diagramme de classe

En utilisant une approche orientée objet, nous avons réalisé notre plateforme. Ce diagramme de classes constitue le point de départ de la réalisation de la plateforme.

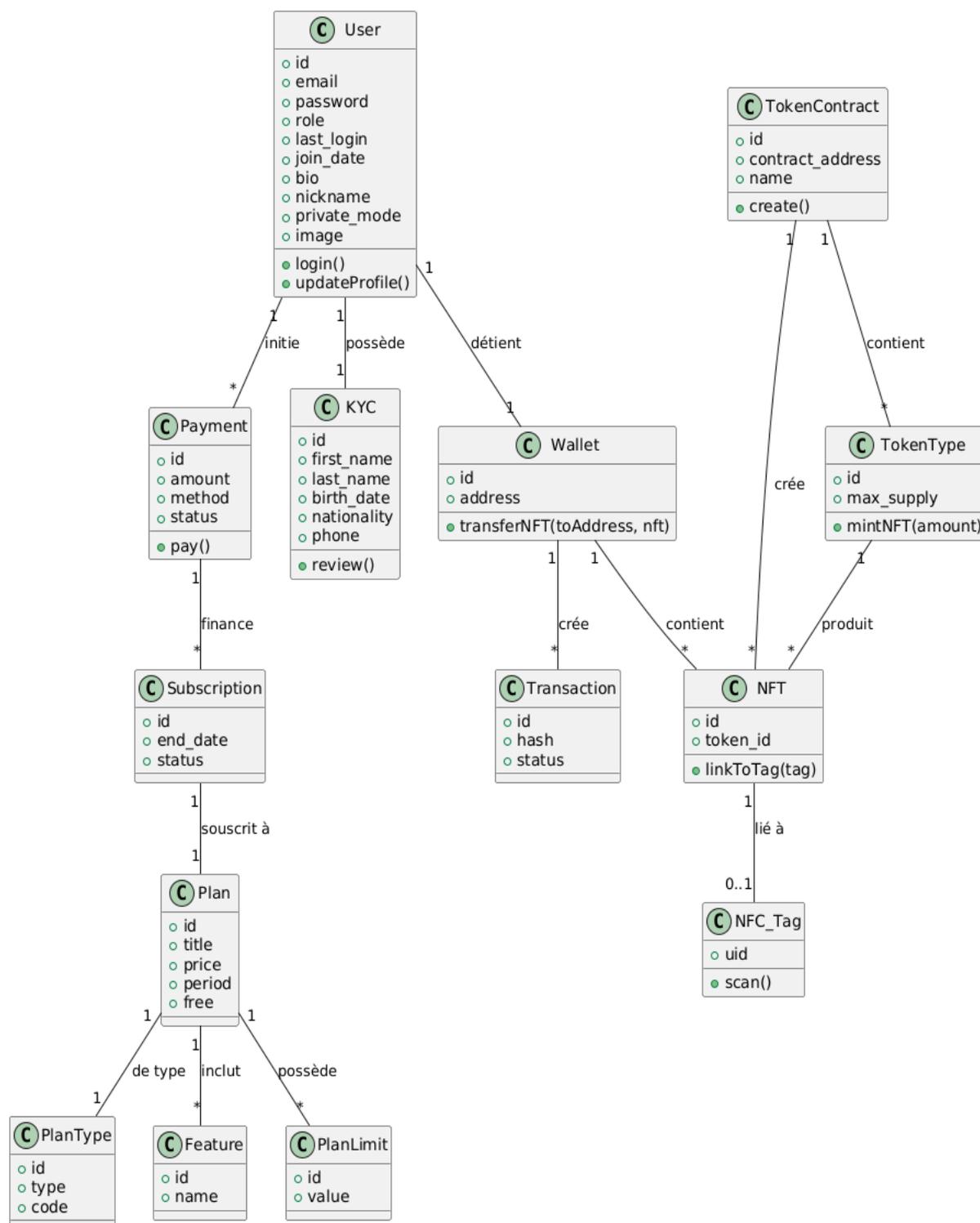


FIG. 2.4 – Diagramme de classe

### 2.5.3 Scénarios de fonctionnement

Cette section décrit les principaux scénarios de fonctionnement de la plateforme, depuis l'enregistrement des utilisateurs jusqu'à la gestion du cycle de vie des NFTs. Elle met en évidence trois étapes clés : la création des comptes et des portefeuilles, la création et le minting des NFTs, ainsi que le transfert de propriété entre utilisateurs.

#### Création des portefeuilles numérique

Nous sommes éligibles pour créer des portefeuilles en utilisant l'utilisateur venly. Tous les portefeuilles sont créés en utilisant un seul utilisateur venly, puis nous affecterons un portefeuille à chaque utilisateur de notre plateforme.<sup>6</sup>

Lors de l'inscription sur la plateforme Artia, un portefeuille blockchain est automatiquement attribué à chaque utilisateur grâce à l'intégration de l'API Venly. Le processus se déroule ainsi :

- Inscription de l'utilisateur via l'interface (email, mot de passe...).
- Authentification du backend auprès de l'API Venly.
- Obtention d'un token sécurisé pour autoriser l'action.
- Création du portefeuille via une requête sécurisée.
- Réception des données du portefeuille (adresse publique, ID).
- Enregistrement du portefeuille lié à l'utilisateur dans la base de données.
- Confirmation : l'utilisateur est informé que son portefeuille est prêt à l'emploi.

#### Création et mint des NFTs

Chaque œuvre enregistrée sur la plateforme est représentée par un NFT unique. Ce NFT contient les métadonnées descriptives de l'œuvre (titre, auteur, image, etc.).<sup>7</sup>

Lorsqu'un artiste souhaite certifier une œuvre numérique, la plateforme Artia propose un processus sécurisé et automatisé basé sur l'API Venly, garantissant l'authenticité, la traçabilité et l'intégration sur la blockchain.

Le déroulement se fait en 11 étapes clés :

- Connexion de l'artiste à son compte.
- Soumission de l'œuvre avec ses métadonnées et la quantité de copies à générer.
- Validation manuelle par un administrateur (approuvé ou refusé).
- Authentification du backend auprès de Venly.
- Création ou récupération d'un contrat NFT pour l'artiste.
- Définition du type de jeton (nom, symbole, métadonnées communes).
- Vérification de la création du type de jeton via Venly.
- Minting des NFTs : création effective sur la blockchain.
- Récupération des données critiques : tokenId, txHash, URI.
- Sauvegarde en base de données (œuvre, NFT, artiste, transaction).
- Notification à l'artiste de la réussite du processus.

---

<sup>6</sup>Voir la section 3.2.1 pour une description détaillée du processus de création et d'association des portefeuilles.

<sup>7</sup>Voir la section 3.2.1 pour une description détaillée du processus de création le mint des NFTs.

## Transfert des NFTs

Les NFTs peuvent être transférés d'un utilisateur à un autre via la plateforme. Chaque transfert est enregistré sur la blockchain et la base de données, assurant transparence et traçabilité. Cela permet de changer de propriétaire tout en conservant l'historique de l'œuvre.

La plateforme Artia permet de transférer la propriété d'un NFT d'un utilisateur à un autre grâce à l'API Venly, tout en garantissant la traçabilité sur la blockchain.

Le processus suit 6 étapes clés :

- Demande de transfert : L'émetteur fournit le tokenId, l'adresse du contrat, et celle du portefeuille de destination.
- Validation et déclenchement : Le Backend vérifie la demande puis appelle l'API Venly.
- Transaction blockchain : L'API interagit avec le smart contract pour effectuer le transfert.
- Retour du statut : Venly renvoie le txHash et la confirmation d'exécution.
- Journalisation : Tous les détails sont enregistrés en base de données (NFT, adresses, contrat, txHash).
- Confirmation : L'émetteur est notifié du succès du transfert avec preuve à l'appui.

## 2.6 Conclusion

La phase de conception est déterminante dans le processus de développement de notre solution, car c'est clairement la phase où l'architecture du système ainsi que les interactions entre les différents acteurs sont définies avec précision. À partir des besoins fonctionnels et non fonctionnels qui ont préalablement été identifiés, nous avons pu établir une représentation claire de l'environnement du projet. Les diagrammes UML que nous avons présentés (cas d'utilisation, classe et séquences), d'une part, permettent de visualiser le comportement du système et, d'autre part, de structurer les entités principales du projet et de simuler les scénarios d'interactions (ou d'échanges) entre les différents utilisateurs et les différents composants. Le schéma global du système donne, pour sa part, la vue d'ensemble (la perspective), à la fois géographique et orientée vers les flux d'information, de l'infrastructure choisie pour le développement.

Cette conception détaillée est venue nous apporter la planéité souhaitée avant de passer à la phase de réalisation, en assurant une bonne coordination entre les objectifs initiaux du projet et l'implémentation technique qui suivra.

# CHAPITRE 3

## Mise en œuvre de la plateforme

---

### 3.1 Introduction

Ce chapitre décrit en détail le processus de mise en œuvre de la plateforme créée dans le cadre de ce projet. Il s'agit d'un système complet utilisant les technologies blockchain, NFT et NFC pour permettre la certification, la traçabilité et la vérification de l'authenticité des œuvres artistiques. Nous commençons par présenter l'environnement de développement et les outils utilisés, qu'il s'agisse de langages de programmation, de frameworks ou de plateformes logicielles. Nous aborderons ensuite la mise en œuvre des différents composants du système, notamment les plateformes web et mobile, ainsi que les modules d'intégration blockchain et les mécanismes de sécurité des données. Enfin, afin de garantir une expérience utilisateur fluide et conviviale répondant aux exigences fonctionnelles décrites dans les chapitres précédents, nous illustrerons l'interface utilisateur graphique.

### 3.2 Environnement et outils de travail

#### 3.2.1 Langages de programmation et logiciels

##### Langages de programmation et frameworks

- **JavaScript** : JavaScript est un langage de programmation interprété et orienté objet, largement utilisé pour développer des interfaces utilisateur interactives sur le web. Créé en 1995 par Brendan Eich chez Netscape, il est devenu un standard côté client. Il permet de modifier dynamiquement le contenu HTML, de gérer les événements utilisateur et de communiquer avec des serveurs via des requêtes asynchrones (AJAX). Avec l'apparition de l'environnement Node.js, JavaScript est également employé côté serveur, renforçant son rôle dans les architectures full-stack. Grâce à sa flexibilité, son intégration dans tous les navigateurs modernes et un écosystème riche (frameworks, bibliothèques, outils), il constitue aujourd'hui un pilier du développement web moderne [31, 18].
- **VueJS** : Vue.js est un framework JavaScript progressif pour la création d'interfaces utilisateur. Créé par Evan You en 2014, Vue.js se distingue par sa simplicité

d'apprentissage, sa flexibilité et sa capacité à être intégré progressivement dans des projets existants. Il repose sur un système de composants réactifs, permettant de construire des interfaces dynamiques de manière modulaire [51]. Vue.js utilise une syntaxe déclarative inspirée de HTML, ce qui facilite sa prise en main, tout en offrant des fonctionnalités avancées comme le *binding* bidirectionnel, le routage, la gestion d'état (via Vuex ou Pinia) et la *Composition API* dans ses versions récentes. Grâce à son écosystème riche et sa documentation claire, Vue.js est largement utilisé dans des projets web modernes, aussi bien par des développeurs indépendants que dans des environnements professionnels [19].

- **Python** : Python est un langage de programmation interprété, polyvalent et de haut niveau, reconnu pour sa syntaxe claire et sa facilité d'apprentissage. Créé par Guido van Rossum et publié pour la première fois en 1991, il est largement utilisé dans le développement web, la science des données, l'automatisation, l'intelligence artificielle et bien d'autres domaines. Python dispose d'un vaste écosystème de bibliothèques et frameworks qui facilitent la programmation rapide et efficace [37].
- **Django** : Django est un framework web Python de haut niveau qui favorise un développement rapide et une conception claire et pragmatique. Conçu par des développeurs expérimentés, il simplifie grandement le développement web, vous permettant ainsi de vous concentrer sur le développement de votre application sans avoir à tout réinventer. C'est un framework gratuit et opensource [11].
- **Java** : Java est un langage de programmation et une plate-forme de calcul lancé par Sun Microsystems en 1995. Depuis ses débuts modestes, Java a beaucoup évolué. À l'heure actuelle, une grande partie du monde numérique dépend de Java : de nombreux services et applications reposent sur cette plate-forme fiable. De même, de nouveaux produits et services numériques innovants et tournés vers l'avenir dépendent aussi de Java [35].
- **Kotlin** : Kotlin est un langage de programmation Open Source à typage statique qui est compatible avec la programmation orientée objet et la programmation fonctionnelle. Il offre une syntaxe et des concepts similaires à ceux d'autres langages, tels que C#, Java et Scala. Kotlin ne cherche pas à être unique, mais s'appuie sur des décennies de développement en langages de programmation. Il existe dans des variantes qui ciblent la JVM (Kotlin/JVM), JavaScript (Kotlin/JS) et le code natif (Kotlin/Native) [21].

## APIs :

- **Venly** :  
Venly est une plateforme de développement blockchain tout-en-un permettant aux entreprises et développeurs de créer, gérer et intégrer des actifs numériques dans leurs applications avec simplicité et sécurité [48].
  - **Présentation générale** :  
Venly propose une solution complète qui inclut la gestion de portefeuilles numériques, la création (minting) de NFTs, et des interactions sécurisées avec diverses blockchains. Sa couche de sécurité avancée garantit la conservation et le contrôle total des actifs par les utilisateurs [50].
  - **Utilisation dans notre plate-forme** :  
Dans notre projet , Venly est utilisée pour :

- **Création et gestion sécurisée de portefeuilles blockchain** : Dans le cadre de notre plateforme Artia, chaque utilisateur se voit automatiquement attribuer un portefeuille blockchain sécurisé lors de son enregistrement. Ce processus repose sur l'intégration de l'API Venly, qui facilite la création, l'authentification et la gestion des portefeuilles de manière transparente. Le déroulement se fait en plusieurs étapes :
  1. **Enregistrement de l'utilisateur** : L'utilisateur initie le processus d'inscription en soumettant ses informations personnelles via l'interface de la plateforme (email, mot de passe, etc.).
  2. **Authentification auprès de l'API Venly** : Le backend de la plateforme transmet une requête à l'API Venly pour authentifier la session et obtenir un jeton sécurisé d'accès.
  3. **Réception du jeton d'authentification** : L'API Venly retourne un *token* permettant de réaliser les opérations sensibles liées à la création du portefeuille.
  4. **Création du portefeuille** : Grâce à ce jeton, une requête est envoyée à Venly pour générer un nouveau portefeuille numérique pour l'utilisateur. Cette opération est réalisée de manière sécurisée côté serveur.
  5. **Récupération des informations du portefeuille** : Après création, Venly retourne les données du portefeuille (identifiant, adresse publique, etc.) nécessaires pour son utilisation.
  6. **Enregistrement local des données** : Le backend enregistre simultanément les informations de l'utilisateur et celles du portefeuille dans la base de données de la plateforme. Cette association (`userId` `walletId`) garantit que chaque portefeuille est lié à un utilisateur spécifique.
  7. **Confirmation et finalisation** : Une fois les enregistrements effectués avec succès, le backend informe l'utilisateur que son inscription est complète et que son portefeuille est prêt à l'emploi.
- **La création et la gestion des passeports numériques sous forme de NFTs** :

Lorsqu'un artiste souhaite certifier une œuvre numérique sous forme de NFT, la plateforme Artia propose un processus encadré, sécurisé et automatisé s'appuyant sur l'API Venly. Ce processus permet de garantir à la fois l'authenticité de l'œuvre, la traçabilité de sa création, et l'intégration transparente sur la blockchain. Les étapes sont les suivantes :

  1. **Authentification de l'artiste** : L'artiste se connecte à la plateforme en fournissant ses identifiants. Le Backend vérifie l'authentification avec succès.
  2. **Soumission de l'œuvre** : L'artiste soumet les métadonnées descriptives de l'œuvre ainsi que la quantité de jetons à générer (mint).
  3. **Vérification administrative** : Avant toute opération blockchain, une validation manuelle est exigée. Un administrateur examine les informations de l'œuvre et décide de son approbation.
    - *Non approuvée* : Le processus est interrompu et l'artiste est notifié du refus.

- *Approuvée* : Le processus de minting peut être déclenché.
4. **Authentification Venly** : Le Backend s'authentifie auprès de l'API Venly afin d'obtenir un jeton d'accès sécurisé pour les opérations blockchain.
  5. **Création ou utilisation d'un contrat NFT** : Si nécessaire, un contrat intelligent dédié à la collection de l'artiste est créé via Venly, sinon un contrat existant est utilisé.
  6. **Création du type de jeton** : Un nouveau type de NFT est défini (classe de jeton), représentant les propriétés générales communes aux copies mintées (nom, symbole, métadonnées de base).
  7. **Vérification du type de jeton** : Le Backend s'assure que le type de jeton a bien été enregistré et validé via l'API.
  8. **Minting des NFTs** : Le Backend envoie la requête de création effective des NFTs à l'API Venly, incluant les métadonnées, l'image, la quantité à mint, et les portefeuilles de destination.
  9. **Récupération des détails du NFT** : Après minting, le Backend récupère les informations critiques telles que l'identifiant du token (*tokenId*), le hash de la transaction (*txHash*) et l'URI de métadonnées.
  10. **Sauvegarde des données** : Toutes les données du NFT, associées à l'artiste et à l'œuvre, sont enregistrées dans la base de données pour assurer leur traçabilité.
  11. **Confirmation** : Le système confirme le succès de l'opération et notifie l'artiste que l'œuvre a été mintée avec succès sur la blockchain.
- **Le transfert des NFTs entre portefeuilles utilisateurs** :  
 Pour permettre la cession ou le changement de propriétaire d'une œuvre numérique, notre plateforme propose une fonctionnalité de transfert de NFT entre portefeuilles. Ce processus s'appuie sur l'API Venly afin d'assurer la fiabilité et la traçabilité des transactions sur la blockchain. Les étapes sont les suivantes :
    1. **Demande de transfert** : L'émetteur initie une demande de transfert en soumettant l'identifiant du NFT (*tokenId*), l'adresse du contrat (*contractAddress*), et l'adresse du portefeuille de destination (*toAddress*) au Backend.
    2. **Lancement de l'opération** : Après validation, le Backend appelle l'API Venly pour exécuter le transfert du NFT depuis le portefeuille de l'émetteur vers celui du destinataire.
    3. **Exécution blockchain** : L'API Venly effectue la transaction sur la blockchain, interagissant avec le contrat du NFT pour transférer la propriété.
    4. **Retour du statut de transfert** : L'API renvoie le *hash* de la transaction (*txHash*) ainsi que le statut d'exécution, confirmant le succès du transfert.
    5. **Journalisation** : Le Backend enregistre tous les détails de l'opération dans la base de données : identifiant du NFT, adresses concernées, contrat et *txHash*.

6. **Confirmation** : Le système notifie l'émetteur que le transfert a été effectué avec succès, fournissant le *txHash* comme preuve de l'opération.

- **Sécurité et contraintes** :

Venly assure la sécurité via des clés privées gérées côté client ou via leur solution d'auto-conservation. La plateforme offre aussi des mécanismes pour gérer les accès et les permissions des utilisateurs, garantissant la confidentialité et l'intégrité des données blockchain [49].

- **Conclusion** :

Venly constitue un composant essentiel de notre solution, fournissant l'infrastructure blockchain sécurisée et simplifiée nécessaire pour la gestion des actifs numériques et la protection des œuvres artistiques par des passeports numériques NFT.

### Chargily :

Chargily est une solution de paiement en ligne développée en Algérie. Elle permet aux commerçants, développeurs et plateformes web d'accepter des paiements électroniques via les cartes **Edahabia** (Algérie Poste) et **CIB** (Carte interbancaire). Ce service facilite l'intégration de paiements sécurisés dans les applications web et mobiles.

- **Utilisation dans notre plate-forme** :

L'API Chargily Pay est utilisée dans notre plateforme pour permettre aux utilisateurs (collectionneurs ou acheteurs) de :

- Payer un abonnement pour obtenir des avantages supplémentaires.
- garder l'historique du paiement pour chaque utilisateur.

- **Fonctionnement technique** :

Chargily propose une API REST permettant de générer dynamiquement des factures. Le processus typique est le suivant :

1. Génération d'une facture par le backend via l'API Chargily.
2. Envoi à l'utilisateur d'un lien de paiement.
3. Validation du paiement effectuée via un webhook signé par Chargily à destination de notre plateforme.

- **Exemple de requête HTTP** :

```
POST /api/invoice HTTP/1.1
Host: pay.chargily.net
Authorization: Bearer YOUR_API_KEY
Content-Type: application/json

{
  "client": "nom@example.com",
  "amount": 2500,
  "invoice_number": "NFT-00987",
  "mode": "EDAHABIA",
  "back_url": "https://artia.com/payment/return",
  "webhook_url": "https://artia.com/api/payment/webhook"
}
```

- **Sécurité et contraintes :**

L'authentification par clé API et l'utilisation du protocole HTTPS garantissent la sécurité. Toutefois, le paiement reste manuel via l'application bancaire, ce qui peut engendrer un léger délai comparé aux paiements instantanés.

- **Conclusion :**

L'intégration de Chargily Pay permet à nous d'adopter un système de paiement local, sécurisé, conforme aux infrastructures algériennes et adapté aux habitudes des utilisateurs.

## Logiciels

- **PyCharm :** PyCharm est un environnement de développement intégré (IDE) Python dédié, offrant une large gamme d'outils essentiels pour les développeurs Python, étroitement intégrés pour créer un environnement pratique pour un développement Python, web et de science des données productif [28].
- **Android Studio :** Android Studio est l'environnement de développement intégré (IDE) officiel des applications Android. Basé sur le puissant outil de développement et d'édition de code d'IntelliJ IDEA, Android Studio offre encore plus de fonctionnalités qui améliorent votre productivité lorsque vous créez des applications Android [20].
- **Visual Studio Code :** Visual Studio Code est un éditeur de code source léger, mais puissant, qui s'exécute sur votre bureau et est disponible pour Windows, macOS et Linux. Il est livré avec un support intégré pour JavaScript, TypeScript et Node.js et dispose d'un riche écosystème d'extensions pour d'autres langages et environnements d'exécution (tels que C++, C#, Java, Python, PHP, Go, .NET) [32].
- **MySQL Workbench :** MySQL Workbench est un outil visuel officiel pour la conception, le développement et l'administration des bases de données MySQL. Il fournit des fonctionnalités pour la modélisation de données, la gestion des bases, la configuration du serveur et le développement SQL, facilitant ainsi le travail avec la base de données open source MySQL [34].

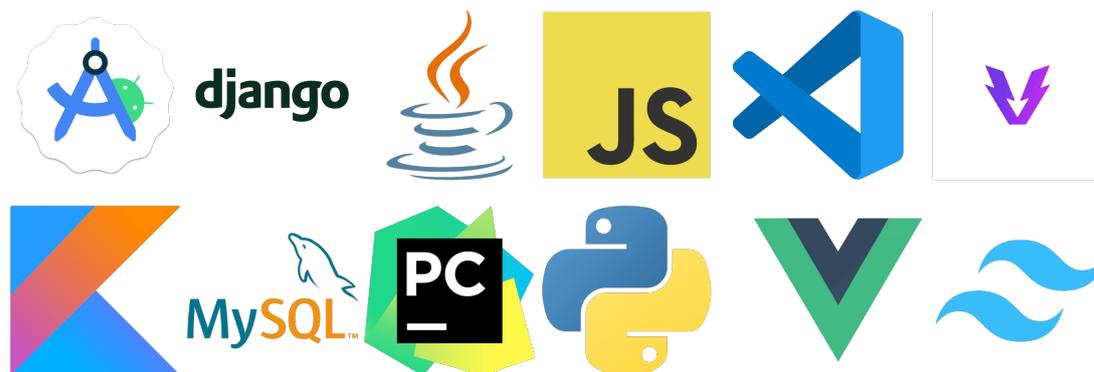


FIG. 3.1 – Logos des outils utilisées

### 3.2.2 Outils utilisé

#### La technologie NFC

La **NFC** (Near Field Communication) est une technologie de communication sans fil à courte portée qui permet l'échange de données entre deux appareils compatibles situés à quelques centimètres l'un de l'autre. Elle repose sur des normes telles que **ISO/IEC 18092** (NFCIP-1) et **ISO/IEC 14443** pour les communications RFID sans contact [23].

Selon Mike Hendry [23], la NFC permet une interaction intuitive par simple proximité ou contact léger, rendant cette technologie idéale pour les paiements, le contrôle d'accès, l'identification, ou encore l'interaction avec des objets intelligents.

D'après STMicroelectronics [41], une **puce NFC** est un circuit intégré (IC) couplé à une antenne, permettant d'émettre et de recevoir des données via un champ électromagnétique induit.

On distingue deux modes :

- **Mode actif** : l'appareil (ex. smartphone) génère le champ magnétique.
- **Mode passif** : la puce absorbe ce champ pour fonctionner sans batterie, comme les étiquettes ou cartes NFC.

#### Modes de fonctionnement :

- **Lecteur/Écrivain** (Read/Write) : permet à un appareil (comme un smartphone) de lire ou d'écrire des données sur une puce NFC passive. C'est le mode utilisé dans notre application.  
*Exemples* : encoder (écrire) une URL sur une puce NTAG 213 via une application mobile ; puis scanner (lire) cette puce avec un smartphone pour ouvrir automatiquement cette URL.
- **Pair à pair** (Peer-to-Peer) : permet l'échange bidirectionnel de données entre deux appareils NFC actifs.  
*Exemple* : transfert de fichiers ou de contacts entre deux smartphones via Android Beam.
- **Émulation de carte** (Card Emulation) : permet à un appareil (comme un smartphone) de se comporter comme une carte NFC (ex. carte bancaire, badge d'accès).  
*Exemple* : utiliser un smartphone pour effectuer un paiement sans contact via Google Pay ou Apple Pay.

#### Types de tags selon le NFC Forum [30, 41].

- **Type A/B** : normes ISO/IEC 14443 (cartes bancaires, passeports)
- **Type F (FeliCa)** : très utilisé en Asie
- **Type V (ISO/IEC 15693)** : logistique longue portée
- **Types 1 à 5** : selon capacité, vitesse et usages spécifiques

#### Familles de puces courantes [39, 38].

- **NTAG 213/215/216** : tags marketing, URL, amiibo
- **MIFARE Ultralight EV1/EV2** : tickets, événements
- **MIFARE DESFire EV1/EV2** : cartes d'accès sécurisées
- **MIFARE Classic, Plus** : diverses applications ISO 14443

## Choix du type de puce NFC utilisé

Pour cette application, on a choisi le type de puces **NTAG 213**, en raison de ses caractéristiques adaptées à notre cas d'usage :

- **Petite taille** : la taille de l'étiquette est de  $12 \times 19$  mm, ce qui permet une intégration discrète sur les objets.
- **Capacité mémoire** : avec une mémoire de 144 octets, elle est suffisante pour stocker une URL, ce qui correspond parfaitement à notre besoin de redirection vers un passeport numérique.
- **Encodage facilité** : ces puces peuvent être facilement encodées à l'aide d'un smartphone via notre application mobile, rendant le processus accessible et pratique pour les utilisateurs non techniques.

## 3.3 Implémentation du système

### 3.3.1 Plateforme Web

Au cœur de l'interface de tout système des Arts numériques se trouve la plateforme web. Conçue pour permettre aux artistes, collectionneurs et administrateurs de gérer les œuvres numériques, d'interroger les passeports digitaux, de manipuler la blockchain et de veiller à la traçabilité des œuvres d'art, celle-ci est principalement axée sur l'expérience utilisateur.

#### Technologies utilisées

Le développement de l'interface utilisateur a été exécuté au moyen du Framework **Vue.js 3**, qui permet d'assurer la gestion réactive de l'état de l'interface et de différencier clairement la logique métier de la présentation. Le style de l'interface utilisateur a été assuré par la bibliothèque utilitaire de classes CSS **Tailwind CSS**, permettant un style moderne, responsive et rapidement intégrable. L'association de ces choix techniques assure une expérience fluide, quel que soit le type de terminal utilisé (desktop, tablette, mobile).

Sur le plan architectural, la plateforme frontend adopte le modèle **MVVM (Model - View - ViewModel)**. Ce modèle permet une séparation claire entre les données (Model), la présentation (View) et la logique de l'interface (ViewModel). En pratique, les templates Vue constituent la vue, les objets JavaScript définissant le comportement des composants jouent le rôle de ViewModel, et les données proviennent de l'API backend Django. Cette séparation permet une meilleure testabilité, maintenabilité et réactivité de l'interface.

Pour sa part, le backend de la plateforme consomme une API REST développée au moyen de **Django REST Framework** exposant l'ensemble des fonctions métier sous la forme d'API sécurisées. Les échanges entre frontend et backend s'effectuent selon le protocole HTTPS avec des échanges de données en JSON.

#### Authentification et sécurité

La gestion de l'authentification utilisateur repose sur le principe du **JSON Web Tokens (JWT)**. Lors de l'identification, un token est généré et stocké localement dans le

navigateur (localStorage) et est systématiquement attaché à toute requête HTTP relativement à l'API afin de garantir que l'identification de l'utilisateur a bien été réalisée. De multiples couches de sécurité ont été mises en œuvre :

- Utilisation du protocole **HTTPS** pour tous les échanges réseau.
- Mise en œuvre de **CORS** (Cross-Origin Resource Sharing) pour limiter l'accès à l'API.
- Expiration automatique des jetons JWT et mécanisme de renouvellement.
- Contrôle d'accès basé sur le rôle (artiste, collectionneur, galeriste et administrateur) pour restreindre les actions disponibles selon le profil utilisateur.

## Fonctionnalités principales de la plateforme web

La plateforme offre un ensemble de fonctionnalités adaptées aux différents acteurs du système :

- **Inscription et authentification des utilisateurs** : chaque utilisateur peut créer un compte en renseignant ses informations personnelles. Les comptes sont ensuite vérifiés avant d'être pleinement activés.
- **Création et gestion des œuvres d'art numériques** : les artistes peuvent soumettre de nouvelles œuvres avec description, image, titre, date de création, et autres métadonnées. Chaque œuvre peut ensuite être mintée en tant que NFT sur la blockchain.
- **Consultation des passeports numériques** : chaque œuvre est associée à un passeport numérique généré automatiquement lors de son enregistrement. Ce passeport contient toutes les informations sur l'œuvre, son propriétaire, son historique de transactions, et un lien vers le certificat d'authenticité sur la blockchain.
- **Interface d'administration** : une interface réservée aux administrateurs permet de gérer les utilisateurs, valider les œuvres avant publication, superviser les activités, et maintenir l'intégrité du système.

Chaque interaction avec la blockchain est déclenchée depuis l'interface web, mais exécutée de manière sécurisée via le backend, assurant que les clés privées des utilisateurs ne sont jamais exposées.

## Architecture et organisation

L'architecture du frontend repose sur une organisation modulaire :

- **Pages** : représentent les vues principales accessibles par URL (accueil, tableau de bord, détail d'œuvre, etc.).
- **Composants** : blocs réutilisables comme les cartes d'œuvres, les modales, les formulaires, etc.
- **Services** : gestion des appels API, de l'authentification, et de la communication avec le backend.

Cette organisation permet une maintenabilité du code élevée et une facilité d'ajout de nouvelles fonctionnalités.

Cette séparation claire améliore la testabilité, la modularité et la maintenabilité du code mobile, tout en garantissant une expérience utilisateur fluide et cohérente avec la version web. Ainsi, Artia offre une architecture harmonisée entre ses applications web et mobile, facilitant la cohérence fonctionnelle et technique sur toutes les plateformes.

### 3.3.2 Plateforme Mobile

L'application mobile Artia a été spécifiquement développée pour les appareils Android à l'aide du langage **Kotlin**, en tirant parti des dernières fonctionnalités du SDK Android moderne. Cette application offre aux utilisateurs une alternative mobile à la plateforme web, avec un accent particulier sur l'accessibilité, la portabilité et les fonctionnalités liées à l'interaction physique avec les œuvres, notamment via les technologies **NFC** et **biométrie**. L'application utilise la même API REST fournie par le backend Django que la plateforme web. Elle suit une architecture basée sur le modèle **MVVM (Model - View - ViewModel)**, qui est la recommandation actuelle pour le développement Android moderne.

#### Architecture de l'application

- Le **Model** correspond aux données métier récupérées via l'API REST et peut inclure les classes de données Kotlin ainsi que la gestion des sources de données réseau ou locales.
- La **View** est représentée par les *Activities* ou *Fragments*, responsables de l'affichage et de l'interaction utilisateur.
- Le **ViewModel** agit comme intermédiaire entre la View et le Model, préparant les données pour l'affichage et gérant la logique de présentation.

#### Objectifs et portée

La plateforme mobile permet aux utilisateurs (artistes, collectionneurs, galeriste ou visiteurs) de :

- Se connecter à leur compte et gérer leur portefeuille numérique.
- Consulter les œuvres numériques ainsi que leurs passeports digitaux.
- Interagir avec la blockchain via un accès simplifié et sécurisé.
- Scanner des **puces NFC** intégrées aux œuvres pour consulter instantanément les données d'authenticité.
- Sécuriser l'accès à l'application via l'authentification biométrique.

#### Fonctionnalités spécifiques à la plateforme mobile

Certaines fonctionnalités sont propres à l'environnement mobile et enrichissent l'expérience utilisateur :

- **Scan de puces NFC** : l'application permet de lire les tags NFC intégrés aux œuvres physiques. Lorsqu'un tag est détecté, son contenu est décodé, puis une requête est envoyée à l'API pour récupérer les données de l'œuvre correspondante.
- **Reconnaissance de texte via caméra (OCR)** : une fonctionnalité expérimentale permet de scanner des documents ou des titres via la caméra pour en extraire automatiquement le texte, grâce à la bibliothèque **ML Kit** de Google.

## Dépendances et bibliothèques utilisées

L'application repose sur un ensemble de bibliothèques modernes et fiables :

- **Camera / ML Kit (OCR) :**
  - `androidx.camera:camera-core:1.1.0`
  - `androidx.camera:camera-camera2:1.1.0`
  - `androidx.camera:camera-lifecycle:1.1.0`
  - `androidx.camera:camera-view:1.1.0`
  - `com.google.mlkit:text-recognition:16.0.0`
- **QR / Barcode Scanning :**
  - `com.journeyapps:zxing-android-embedded:4.3.0`
  - `com.google.zxing:core:3.5.2`
- **Sécurité / Authentification biométrique :**
  - `androidx.biometric:biometric:1.2.0-alpha05`

Ces dépendances permettent une expérience utilisateur riche, rapide et sécurisée, tout en restant compatibles avec la majorité des appareils Android.

## Synchronisation avec la plateforme web

Toutes les actions réalisées via l'application mobile (connexion, scan d'œuvre, transfert, etc.) sont automatiquement synchronisées avec la base de données centrale via l'API.

### 3.3.3 Intégration Blockchain

L'intégration de la blockchain dans Artia repose sur l'API **Venly**, directement implémentée dans le backend développé avec **Django REST Framework**. Cette architecture centralisée, déjà utilisée par les plateformes web et mobile, permet de gérer toutes les interactions blockchain depuis un point unique et sécurisé.

Concrètement, les actions sensibles — telles que la création de portefeuilles blockchain pour les utilisateurs, le minting des œuvres en NFTs, le transfert de tokens ou la consultation des transactions on-chain — sont déclenchées par les interfaces (web ou mobile), puis traitées côté serveur. Cela garantit la sécurité des opérations, sans exposer les clés privées ni nécessiter de plugins externes (comme Metamask) côté client.

L'intégration de Venly dans le backend repose sur :

- L'utilisation de l'**API REST de Venly**, appelée via des requêtes HTTPS sécurisées.
- La configuration de clés d'API stockées en variables d'environnement pour sécuriser les échanges.
- Des services Python internes (helpers) qui encapsulent les appels aux endpoints Venly (création de wallet, minting, transfert, etc.).
- La mise en place de vérifications et de logs côté serveur pour assurer la traçabilité des opérations blockchain.

Grâce à cette approche, les deux plateformes (web et mobile) peuvent déclencher des opérations blockchain simplement en interagissant avec le backend, sans jamais se soucier de la complexité de la blockchain sous-jacente. Cela assure une **intégration unifiée, sécurisée et transparente** pour tous les utilisateurs.

### 3.3.4 Sécurité et Bonnes Pratiques

#### Sécurisation du Serveur Web (Apache2)

- **HSTS (Strict-Transport-Security)**
  - Imposition stricte du protocole HTTPS
  - Neutralise les attaques *Man-in-the-Middle* (MITM)
  - Configuration typique : `max-age=31536000; includeSubDomains`
- **CSP (Content-Security-Policy)**
  - Restreint les sources de contenu (whitelist)
  - Préviend les attaques XSS (Cross-Site Scripting)
  - Exemple : `default-src 'self'; script-src trusted-cdn.com`
- **X-Frame-Options**
  - Interdit l'intégration du site dans une `iframe`
  - Protège contre le *clickjacking*
  - Valeur recommandée : `DENY`
- **X-Content-Type-Options & Referrer-Policy**
  - Empêche le *MIME-sniffing*
  - Réduit les fuites d'information via les en-têtes HTTP
  - Configurations : `nosniff, strict-origin-when-cross-origin`
- **Permissions-Policy**
  - Restreint l'accès aux API sensibles (caméra, micro, géolocalisation)
  - Exemple : `geolocation=(), camera=()`

#### Pare-feu Applicatif (Middleware Django)

- **Détection proactive**
  - Filtrage via expressions régulières
  - Menaces détectées :
    - Injections SQL (`SELECT * FROM users`)
    - Scripts XSS (`<script>alert()</script>`)
    - Traversée de répertoires (`../etc/passwd`)
    - Pollution d'objets JavaScript (`__proto__`)
- **Réponse sécurisée**
  - Blocage immédiat (HTTP 403)
  - En-tête de diagnostic : `X-Security-Reason`
  - Journalisation automatique des incidents

#### Gestion des Identités et Contrôle d'Accès

- **JWT Renforcés**
  - Jetons d'accès de courte durée (15 min)
  - Rotation automatique des *refresh tokens*
  - Invalidation via blacklist

- **Limitation fine du trafic**
  - Anonymes : 200 requêtes/heure
  - Authentifiés : 1000 requêtes/heure
  - Protection contre les attaques DDoS
- **Protections Transverses**
  - **CORS** : liste blanche des domaines autorisés
  - Validation stricte de l'origine

### Synthèse des Mécanismes de Défense

- **Couche Transport** : HSTS, HTTPS → Interception MITM.
- **Couche Application** : Middleware WAF, CSP → XSS, Injections SQL.
- **Couche Accès** : JWT, Throttling → DDoS, Usurpation de session.
- **Couche Données** : CORS, Referrer-Policy → Fuites d'information.

Ces mécanismes de défense s'alignent avec les recommandations de l'OWASP (Open Web Application Security Project), garantissant une sécurité renforcée à la fois sur le plan réseau, applicatif et utilisateur.

## 3.4 Interface graphique :

- Page d'accueil :

**Welcome to Artia — Your NFT Gallery**

Discover, showcase, and manage your NFT collections effortlessly with Artia.

Login Join Now

**Get the App**  
Scan to download our Android APK directly

Download APK

**NFT Minting**  
Create NFTs from your artworks and link them to blockchain metadata.

- ✓ Powered by Venly
- ✓ Supports ERC-721 standard
- ✓ Blockchain-authenticated artwork

**NFC Artwork Tagging**  
Scan NFC tags on physical artworks to view and verify their digital passports.

- ✓ Connects physical to digital
- ✓ Instant ownership verification
- ✓ Mobile-friendly scanning

**Digital Passport System**  
Each artwork gets a digital certificate containing key provenance data.

- ✓ Owner and creator info
- ✓ Mint date and wallet address
- ✓ Copyright and resale history

**Artist Dashboard**  
Manage your artworks, profile, NFTs, and insights all in one place.

- ✓ Upload and mint artworks
- ✓ Track sales and transfers
- ✓ Edit bio and showcase profile

**Ownership History**  
Easily track the full transfer history of every artwork on-chain.

- ✓ Immutable transaction logs
- ✓ Resale transparency
- ✓ Clear provenance tracking

**Integrated Wallets**  
Users can access their wallet, view NFTs, and initiate transactions.

- ✓ Venly wallet integration
- ✓ Secure NFT management
- ✓ Seamless onboarding

**Ready to Elevate Your Digital Collection?**

Join thousands of creators and collectors on Artia. Secure, showcase, and celebrate your art like never before.

Get Started For Free!

FIG. 3.2 – Page d'accueil

- **L'inscription :**

L'utilisateur remplit les informations nécessaires telles que le nom, le prénom, le numéro de téléphone, etc. Ensuite, il répond à un questionnaire permettant d'identifier son type (artiste, galerie ou collectionneur). Il est également obligatoire de fournir une pièce d'identité (carte d'identité nationale, permis de conduire ou passeport) pour vérification. Un administrateur est chargé de valider l'inscription. L'interface doit rester accessible et facile à utiliser.

18:59

Email

Password 

Confirm Password 

**SIGN UP**

**ALREADY HAVE AN ACCOUNT? LOGIN**

19:17

(a) Formulaire initial

**KYC Registration**  
Step 2 of 4

**Your Identity** SKIP

First Name

Last Name

Choose document **ID**

**SCAN ID**

**PREVIOUS** **NEXT**

**CANCEL**

(c) Questionnaire 2

19:14

**KYC Registration**  
Step 1 of 4

**Select Account Type**

Artist

Gallery

Collector

**NEXT**

**CANCEL**

19:16

(b) Questionnaire 1

**KYC Registration**  
Step 3 of 4

**Your Address**

Phone number

Address

Postal Code

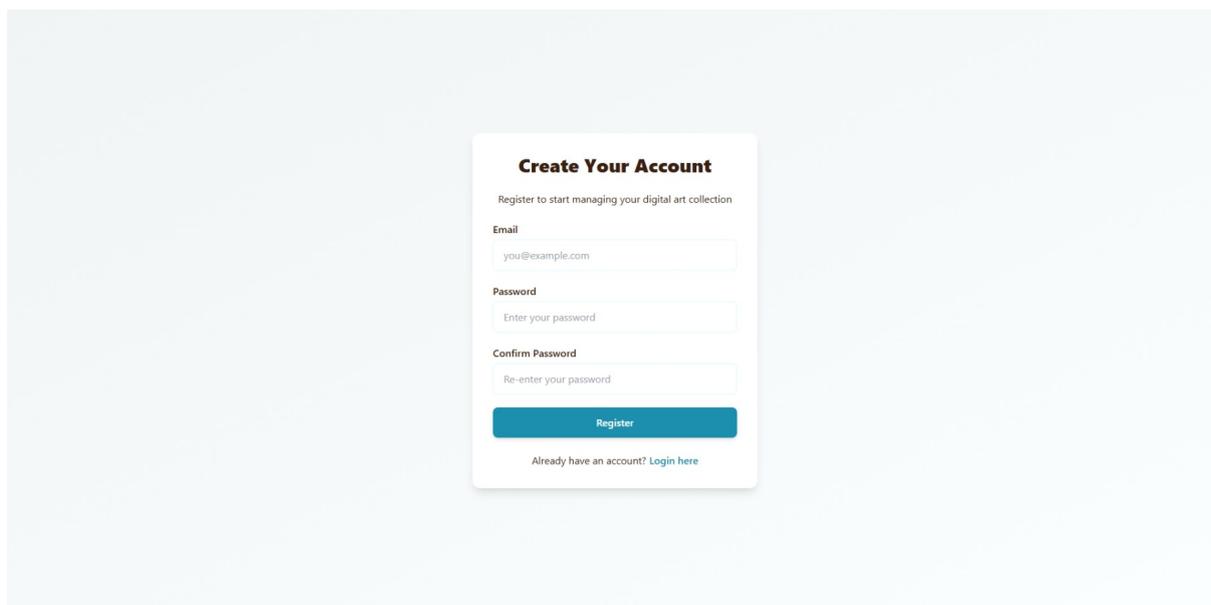
Country

**PREVIOUS** **NEXT**

**CANCEL**

(d) Questionnaire 3

FIG. 3.3 – Étapes du processus d'inscription mobile



**Create Your Account**

Register to start managing your digital art collection

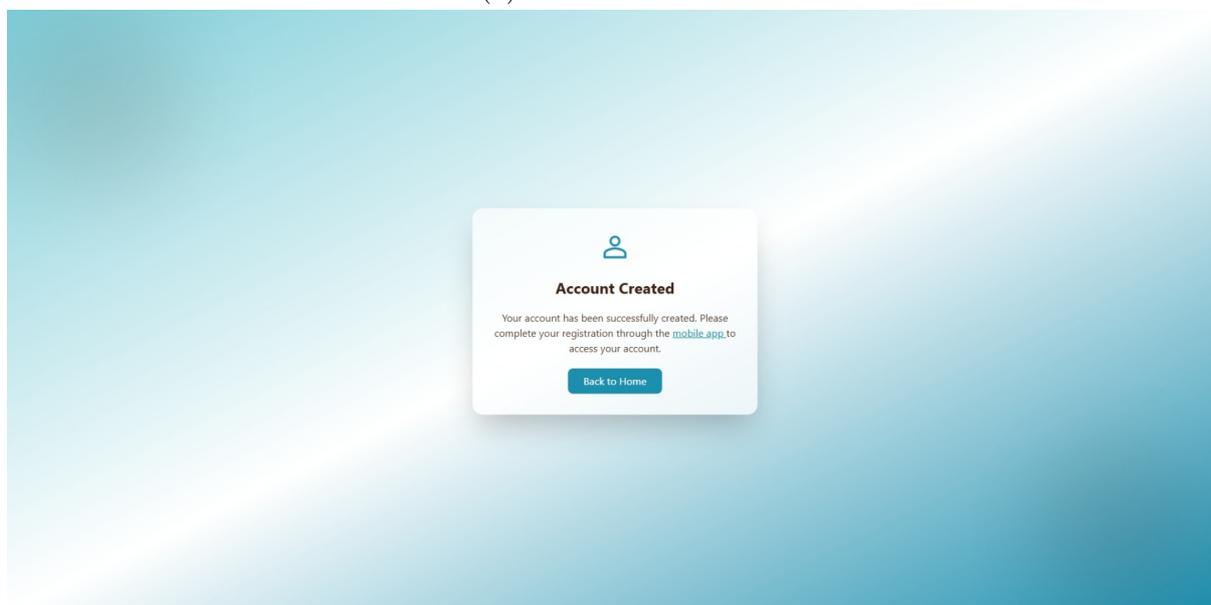
**Email**

**Password**

**Confirm Password**

Already have an account? [Login here](#)

(a) Formulaire initial



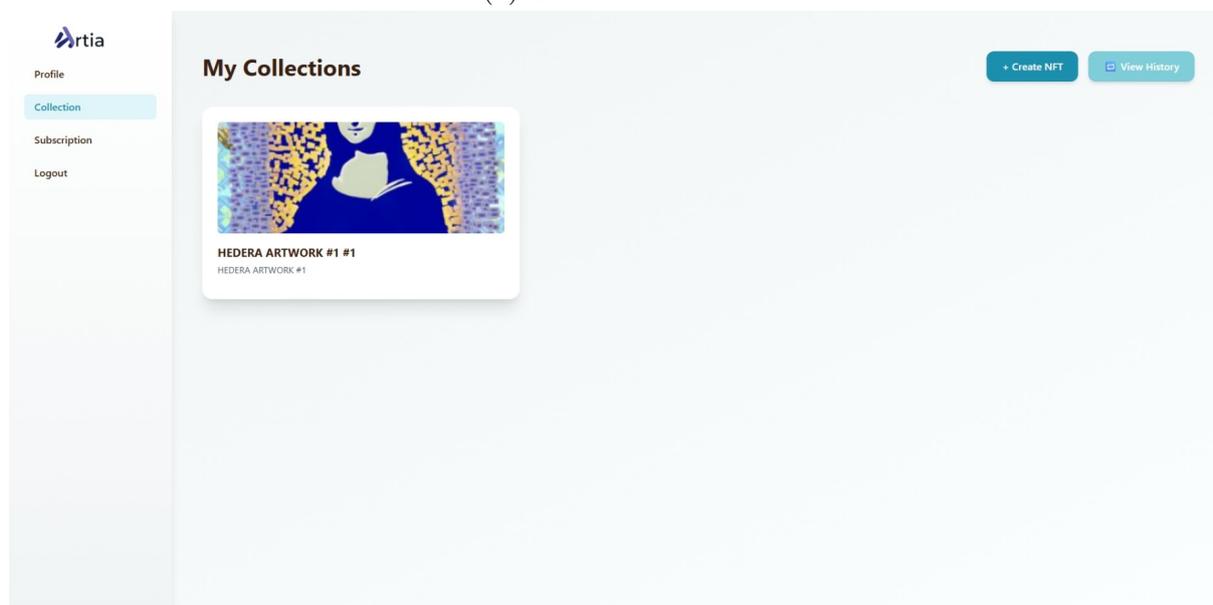
(b) Compléter l'inscription

FIG. 3.4 – Étapes du processus d'inscription web

- Collection :



(a) Collection mobile



(b) Page de collection web

FIG. 3.5 – Collection

- **Création d'une œuvre :**

Si l'utilisateur est un artiste, il peut créer une œuvre en remplissant un formulaire avec des informations telles que le titre, la description, une image, etc. L'œuvre est ensuite soumise à validation par un administrateur. En cas d'acceptation, le système génère un ou plusieurs NFT (selon les paramètres du formulaire), les mint sur la blockchain et conserve une copie des informations dans la base de données pour un accès rapide.

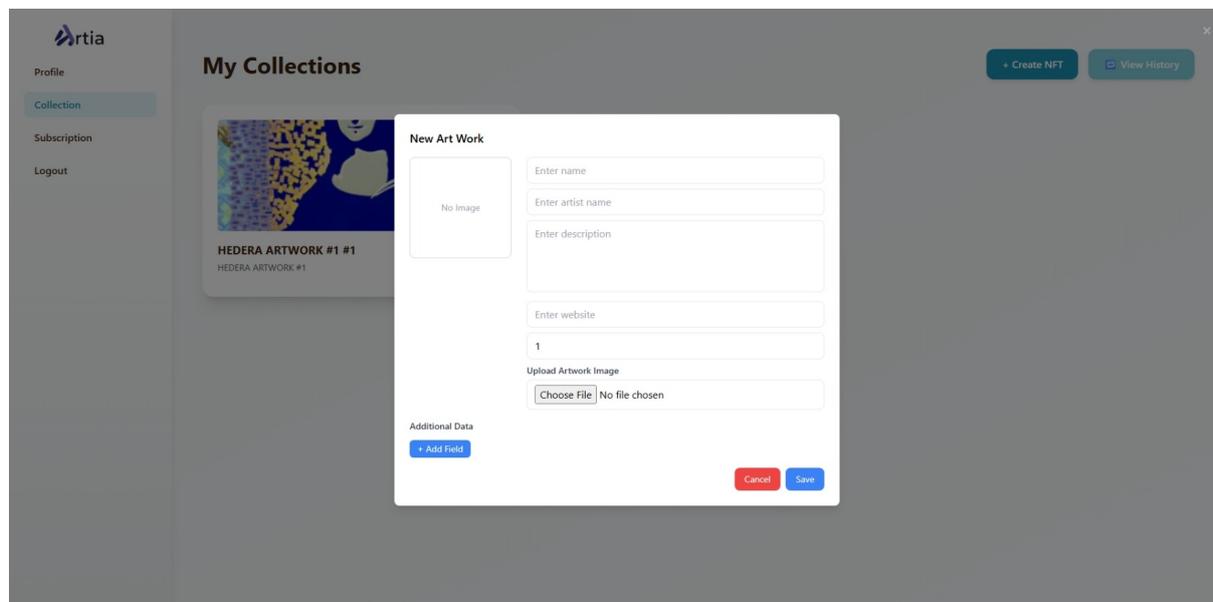
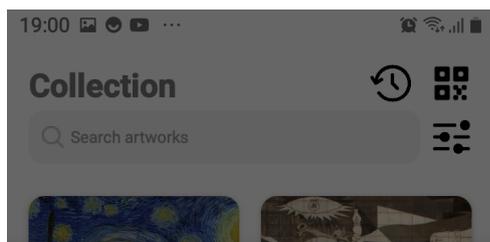


FIG. 3.6 – Création d'un NFT par un artiste dans l'application web



## Add New Artwork

### 1 of 3: General Info

Artwork Name

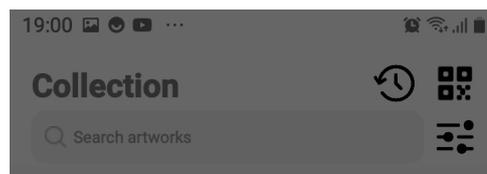
Description

Website URL

Number of Copies

NEXT

(a) Créer un NFT 1



## Add New Artwork

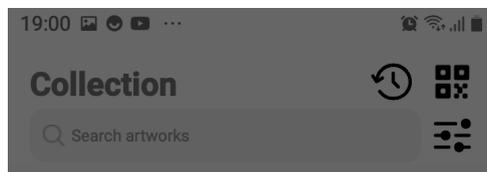
### 2 of 3: Upload Image

SELECT IMAGE

PREVIOUS

NEXT

(b) Créer un NFT 2



## Add New Artwork

### 3 of 3: Properties

+ Add another property

SUBMIT

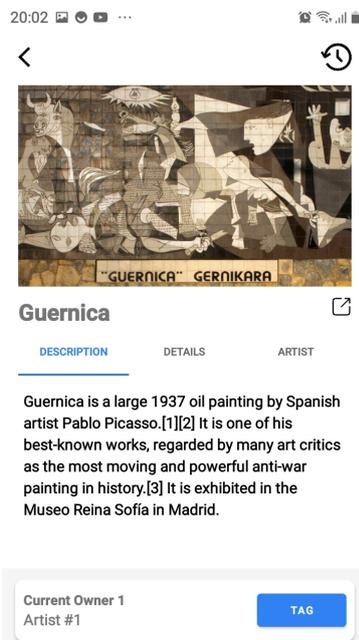
PREVIOUS

(c) Créer un NFT 3

FIG. 3.7 – Étapes de création d'un NFT par un artiste dans l'application mobile

- **Association d'une étiquette NFC :**

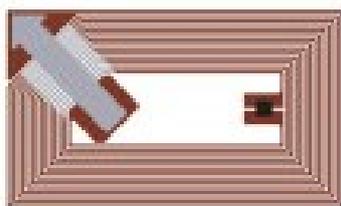
Une fois l'œuvre créée et validée, une étiquette NFC peut être associée à chaque exemplaire physique. En utilisant le bouton TAG pour scanner cette étiquette, l'œuvre physique est liée à son NFT numérique, garantissant ainsi son authenticité. Après le scan, l'association du tag au NFT est effectuée, et le bouton devient SEND, indiquant que l'étiquette a été associée à ce NFT et est prête à être transférée.



(a) NFT non associée à une étiquette NFC



(b) NFT associée à une étiquette NFC



(c) ntag213 NFC étiquette

FIG. 3.8 – NFT associée à une étiquette NFC

- **Transfert d'un NFT :**

Le propriétaire de l'œuvre peut transférer le NFT de deux façons :

- Transfert complet avec les droits d'auteur.
- Transfert simple sans les droits d'auteur.

Pour effectuer le transfert, il suffit de fournir les informations du destinataire(adresse ou code QR du portefeuille numérique).

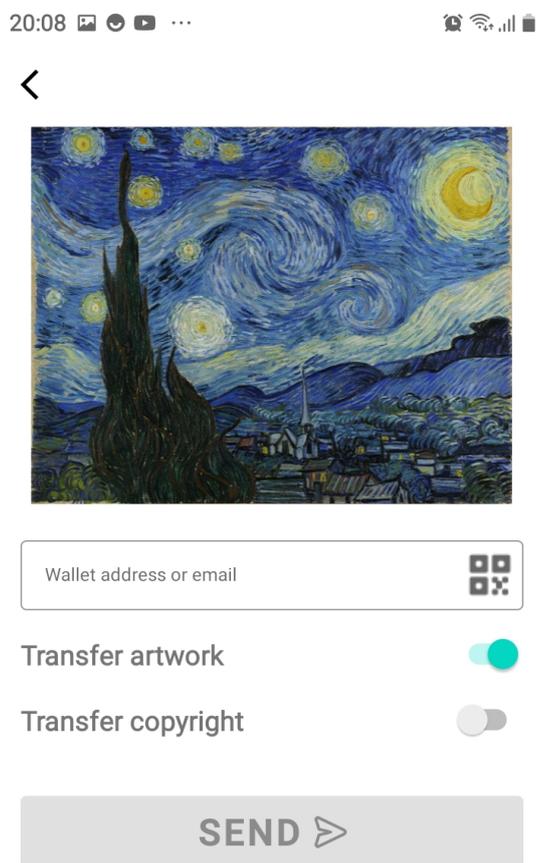


FIG. 3.9 – Transfert d'un NFT

- **Historique des transactions :**

Chaque transfert est enregistré dans un historique des transactions. Cet historique permet de retracer l'ensemble des actions réalisées, assurant ainsi la transparence, la traçabilité et la sécurité des œuvres numériques et physiques. Il est consultable par les parties concernées via l'interface du système.

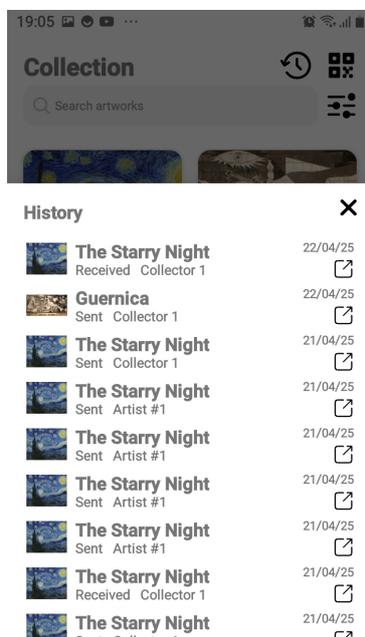


FIG. 3.10 – Historique de transfert d'application mobile

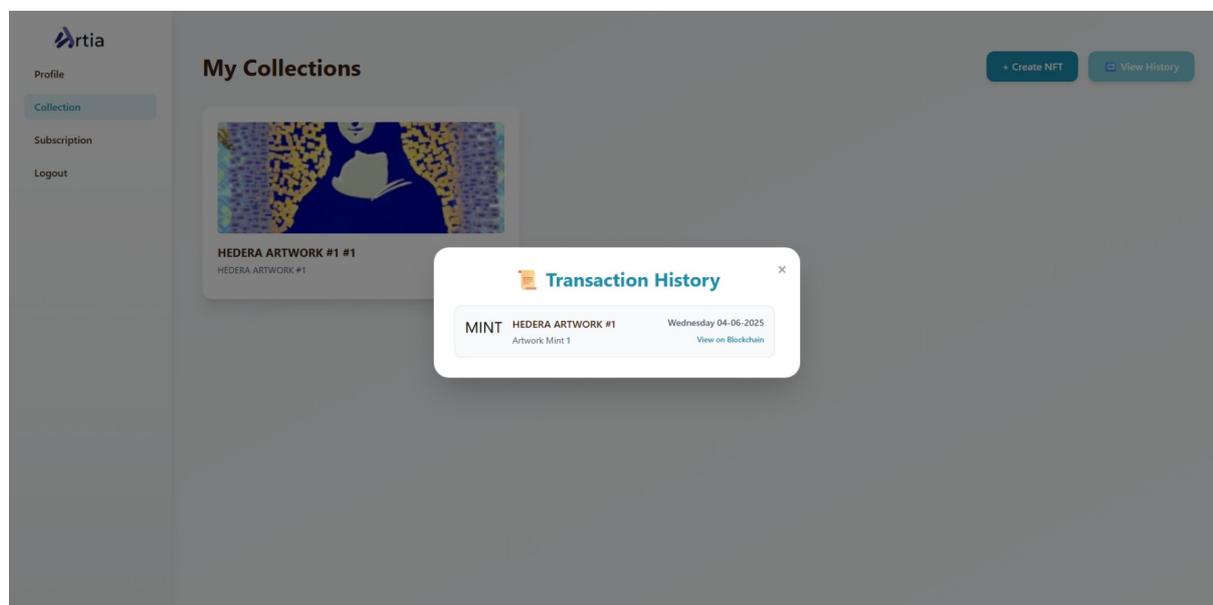


FIG. 3.11 – Historique de transfert d'application web

### Passport digitale :

Un simple scan de l'étiquette NFC apposée sur l'œuvre permet d'accéder à son passeport digitale.

14:19    ...

## The Starry Night

[DESCRIPTION](#)[DETAILS](#)[ARTIST](#)

The Starry Night, often called simply Starry Night, is an oil-on-canvas painting by the Dutch Post-Impressionist painter Vincent van Gogh.

**Current Owner**

Artist #1

FIG. 3.12 – Passport digitale d'une œuvre.

## 3.5 Conclusion

Dans le cadre du chapitre présent, nous sommes revenus sur le processus de mise en place du système de passeport digital pour les œuvres d'art, reposant sur la technologie blockchain, le NFT et la technologie des puces NFC. Dans un premier temps, nous avons exposé l'environnement, ainsi que les outils techniques mobilisés pour la conception de l'architecture du système, en mettant l'accent sur le choix des technologies adaptées aux exigences de sécurité, de traçabilité et d'interopérabilité.

L'intégration du réseau blockchain a permis de garantir l'enregistrement inaltérable des données relatives aux œuvres, et les développements des plateformes web et mobile ont voulu permettre aux différents utilisateurs (administrateurs, artistes, collectionneurs...) de bénéficier d'une interface intuitive. L'institution de la technologie NFC, quant à elle, représente un lien tangible entre le monde physique et le monde numérique, permettant de vérifier au moyen d'un simple scan de manière instantanée et fiable l'authenticité d'une œuvre.

A la suite des résultats que nous avons mis en évidence à partir du prototype fonctionnel, la faisabilité technique de notre dispositif, et donc la possibilité de généraliser ce concept, au-delà du cas présenté, à des cas d'usage qui sauraient s'inscrire dans des usages réels, sont prouvés. Nous avons ainsi fait un pas vers une nouvelle gouvernance dans le cadre de la gestion et de la valorisation des œuvres d'art au sein de laquelle la technologie innovante constituerait une opportunité pour favoriser la transparence et la confiance dans le marché de l'art.

## Conclusion Générale

Dans un contexte où le milieu de l'art évolue considérablement avec l'arrivée de nouvelles technologies, ce mémoire prend pour objet le problème stratégique de la crédibilité et de la sécurité du marché de l'art que constitue l'authenticité et la traçabilité des œuvres dans un secteur réputé pour son opacité, vulnérable à la fraude et à la falsification, qui peine à prouver l'origine, la propriété, et la circulation des œuvres. Ce déficit de transparence a des conséquences sévères : hausse du volume de contrefaçon, pertes financières considérables concomitantes, et la confiance entre artistes, collectionneurs et institutions s'effondre.

Pour relever ces défis, nous avons souhaité proposer des solutions innovantes utilisant les technologies émergentes suivantes : Blockchain, NFTs (Non Fungible Tokens), technologie NFC (Near Field Communication) afin de concevoir un système garantissant de façon fiable et inaltérable le certificat de l'œuvre d'art et son traçage. Pourtant ces technologies récentes présentent en elles-mêmes des propriétés idéales : la blockchain permet un stockage d'informations accessible à tous et impénétrable, les NFTs garantissent de manière indéfectible la propriété numérique de tous biens, matériels ou immatériels et les puces NFC créent le lien entre l'objet physique et son duplicata numérique. A nous de nous proposer un passeport numérique d'œuvre d'art, sûr et accessible.

Ainsi, il est formé, tout au long de ce mémoire, une réponse tangible, concrète, à un problème bien réel. Après une réelle implication dans la recherche documentaire des fondements théoriques de la question et l'examen des projets existants, nous sommes parvenus à proposer une architecture complète, technique et fonctionnelle, en phase avec les réalités du marché de l'art, via une application web (et mobile) permettant aux artistes de créer un NFT représentatif de l'œuvre, d'en adjoindre une puce NFC intégrée physiquement à l'œuvre, et de faire inscrire toutes données nécessaires dans une blockchain publique tout en permettant aux collectionneurs ou institutions de s'assurer de l'authenticité, de la provenance, de l'historique des transferts et des métadonnées de l'œuvre via un simple coup d'œil sur leurs smartphones.

La réalisation technique de cette solution, constituée d'une plateforme web et mobile opérationnelle, constitue une preuve de concept tangible, démontrant ainsi la faisabilité technique de notre approche et ouvrant la voie à une adoption plus large de cette méthode de certification. Le système développé offre à la fois une interface intuitive pour les utilisateurs, un espace sécurisé pour le stockage des données sensibles, et une intégration harmonieuse des trois technologies clés.

Les résultats obtenus se présentent comme encourageants : le passeport numérique apporte, en effet, une transparence accrue des transactions, réduit considérablement le risque de contrefaçon et assainit le climat de confiance instauré entre les acteurs. De plus, l'artiste regagne sa place centrale dans la gestion de l'authenticité de son œuvre, tandis que les collectionneurs disposent d'une garantie pérenne de la valeur de leur acquisition.

Ce projet constitue indéniablement un nombre important de perspectives de développement. En droit, il est a priori nécessaire de faire entrer dans l'appareil juridique les standards internationaux de certification et de propriété intellectuelle, afin d'assurer la reconnaissance légale des NFT comme titres de propriété. De même, l'intégration des institutions culturelles (musées, galeries, maisons de vente) pourrait donner au système plus de légitimité et favoriser sa généralisation dans les usages. Au-delà du champ de l'art, on pourrait aussi penser à des applications similaires au sein d'autres champs de l'ob-

jet : objets de collection, archives documentaires, manuscrits, création numérique, objet de luxe.

En somme, ce travail confirme que l'union des technologies blockchain, NFT et NFC peut constituer un levier technologique au service de la protection, de la mise en valeur, et de la gestion éthique du patrimoine artistique à l'ère du numérique. Ce mémoire ne correspond pas, par conséquent, à un aboutissement, mais bien à un début, qui mériterait d'être approfondi par les chercheurs et les professionnels du secteur, ainsi que par les décideurs publics.

# Bibliographie

---

- [1] BINANCE. *Binance Smart Chain (BSC)*. <https://www.binance.org/en/smartChain>. Consulté le 08 juin 2025.
- [2] BINANCE ACADEMY. *Minting*. <https://academy.binance.com/en/glossary/mint>. Consulté le 14 juin 2025. 2025.
- [3] BINANCE ACADEMY. *Proof of Stake (PoS)*. <https://academy.binance.com/en/glossary/proof-of-stake>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [4] BINANCE ACADEMY. *Proof of Work (PoW)*. <https://academy.binance.com/en/glossary/proof-of-work>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [5] BINANCE ACADEMY. *Public Key*. <https://academy.binance.com/en/glossary/public-key>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [6] BINANCE ACADEMY. *Token vs Coin*. <https://academy.binance.com/en/articles/token-vs-coin>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [7] BINANCE ACADEMY. *What is a Crypto Address?* <https://academy.binance.com/en/glossary/address>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [8] BINANCE ACADEMY. *What is a Crypto Wallet?* <https://academy.binance.com/en/glossary/wallet>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [9] Vitalik BUTERIN. *Ethereum : A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. Consulté le 14 juin 2025. 2013. URL : <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.
- [10] Le DEVOIR. *Vers un passeport numérique québécois*. <https://www.ledevoir.com/economie/868960/devoir-drummondville-vers-passeport-numerique-quebecois-exportation-europe>. Consulté en juin 2025. 2024.
- [11] DJANGO SOFTWARE FOUNDATION. *Django — The Web framework for perfectionists with deadlines*. <https://www.djangoproject.com/>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [12] EON. *H&M – Circular Product Data and Digital ID*. Consulté le 11 juin 2025. 2023. URL : <https://www.eon.xyz/clients/h-m>.
- [13] ETHEREUM FOUNDATION. *Documentation des transactions Ethereum*. Consulté le 14 juin 2025. 2024. URL : <https://ethereum.org/en/developers/docs/transactions/>.

- 
- [14] ETHEREUM FOUNDATION. *Ethereum — A decentralized platform for applications*. <https://ethereum.org>. Consulté le 08 juin 2025.
- [15] ETHEREUM FOUNDATION. *Qu'est-ce qu'un NFT ?* Consulté le 14 juin 2025. 2024. URL : <https://ethereum.org/en/nft/>.
- [16] EU BLOCKCHAIN OBSERVATORY AND FORUM. *Reports and Research*. <https://www.eublockchainforum.eu/reports>. Consulté le 14 juin 2025. 2021.
- [17] EVERLEDGER. *Battery Passports – Everledger*. Consulté le 11 juin 2025. 2024. URL : <https://everledger.io/industry-solutions/batteries/>.
- [18] David FLANAGAN. *JavaScript : The Definitive Guide*. 7<sup>e</sup> éd. O'Reilly Media, 2020.
- [19] Adam FREEMAN. *Pro Vue.js 3*. Apress, 2021. ISBN : 978-1484269809.
- [20] GOOGLE / ANDROID DEVELOPERS. *Introduction à Android Studio*. <https://developer.android.com/studio/intro?hl=fr>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [21] GOOGLE / ANDROID DEVELOPERS. *Présentation de Kotlin*. <https://developer.android.com/kotlin/overview?hl=fr>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [22] HEDERA HASHGRAPH. *Hedera — The public distributed ledger for decentralized applications*. <https://hedera.com>. Consulté le 08 juin 2025.
- [23] Mike HENDRY. *Near Field Communications Technology and Applications*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2014. ISBN : 9781107030408. URL : <https://www.cambridge.org/core/books/near-field-communications-technology-and-applications/6EAA4F6A3C23B9F9607C5A01A8A90E99>.
- [24] HORIZONS. *Moubadara Art : Un incubateur national pour les industries culturelles et créatives*. Consulté le 11 juin 2025. 2024. URL : <https://www.horizons.dz/?p=99562>.
- [25] IBM BLOCKCHAIN. *Blockchain Explained*. Consulté le 14 juin 2025. 2023. URL : <https://www.ibm.com/topics/blockchain>.
- [26] INVESTOPEDIA. *What Does Proof-of-Stake (PoS) Mean in Crypto ?* <https://www.investopedia.com/terms/p/proof-stake-pos.asp>. Consulté le 14 juin 2025. 2023.
- [27] INVESTOPEDIA. *What Is Proof of Work (PoW) in Blockchain ?* <https://www.investopedia.com/terms/p/proof-work.asp>. Consulté le 14 juin 2025. 2024.
- [28] JETBRAINS. *PyCharm Quick Start Guide*. <https://www.jetbrains.com/help/pycharm/quick-start-guide.html>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [29] *L'Union européenne lance le passeport numérique des produits*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip\\_23\\_6257](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_23_6257). Consulté en juin 2025. 2023.
- [30] MACNICA INC.. *NFC Tag Types and Standards*. Consulté en juin 2025. 2023. URL : <https://www.macnica.co.jp/tech/articles/273>.
- [31] MDN WEB DOCS. *JavaScript*. Consulté en juin 2025. 2024. URL : <https://developer.mozilla.org/fr/docs/Web/JavaScript>.
- [32] MICROSOFT. *Visual Studio Code*. <https://visualstudio.microsoft.com/fr/>. Consulté en juin 2025. 2025.

- 
- [33] Satoshi NAKAMOTO. *Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Consulté le 14 juin 2025. 2008. URL : <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [34] ORACLE CORPORATION. *MySQL Workbench*. <https://www.mysql.com/fr/>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [35] ORACLE CORPORATION. *Qu'est-ce que Java ?* [https://www.java.com/fr/download/help/whatis\\_java.html](https://www.java.com/fr/download/help/whatis_java.html). Consulté en juin 2025. 2025.
- [36] POLYGON TECHNOLOGY. *Polygon — Ethereum's Internet of Blockchains*. <https://polygon.technology>. Consulté le 08 juin 2025.
- [37] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python Programming Language*. <https://www.python.org/>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [38] NXP SEMICONDUCTORS. *MIFARE DESFire EV2 Product Overview*. Consulté en juin 2025. 2023. URL : <https://www.nxp.com/products/rfid/nfc/mifare-desfire/mifare-desfire-ev2-contactless-multi-application-ic:MF3DX2>.
- [39] NXP SEMICONDUCTORS. *NTAG213/215/216 Product Datasheet*. Consulté en juin 2025. 2023. URL : [https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/NTAG213\\_215\\_216.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/NTAG213_215_216.pdf).
- [40] SOLANA LABS. *Solana Blockchain*. <https://solana.com>. Consulté le 08 juin 2025.
- [41] STMICROELECTRONICS. *Introduction to NFC Technology*. Consulté en juin 2025. 2023. URL : <https://www.st.com/en/nfc.html>.
- [42] Melanie SWAN. *Blockchain : Blueprint for a New Economy*. Consulté le 14 juin 2025. O'Reilly Media, 2015.
- [43] Don TAPSCOTT et Alex TAPSCOTT. *Blockchain Revolution : How the Technology Behind Bitcoin and Other Cryptocurrencies is Changing the World*. Consulté le 14 juin 2025. Portfolio Penguin, 2016.
- [44] TEZOS FOUNDATION. *Tezos Blockchain*. <https://tezos.com>. Consulté le 08 juin 2025.
- [45] HAL THESES. *Passeport numérique pour le textile*. <https://theses.hal.science/tel-04429696>. Consulté en juin 2025. 2024.
- [46] THESES.FR. *Application du DPP aux batteries*. <https://theses.fr/s371924>. Consulté en juin 2025. 2023.
- [47] THESES.FR. *Passeport numérique pour les dispositifs biomédicaux*. <https://theses.fr/s405227>. Consulté en juin 2025. 2024.
- [48] VENLY. *Venly | The Web3 platform for developers, with secure APIs SDKs*. <https://www.venly.io/>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [49] VENLY. *Venly Tools <> Arbitrum*. <https://docs.arbitrum.io/for-devs/third-party-docs/Venly/>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [50] VENLY. *Venly Wallet Venly Platform : A Complete Guide to Web3 Integration*. <https://medium.com/@FromLagosto/venly-wallet-venly-platform-a-complete-guide-to-web3-integration-602bee9a0002>. Consulté en juin 2025. 2025.
- [51] VUE.JS TEAM. *Vue.js Official Documentation*. Consulté en juin 2025. 2024. URL : <https://vuejs.org>.