

Les NFT en pratique - Des jetons non fongibles comme élément central d'une application de billetterie événementielle basée sur la blockchain

Document de recherche achevé

Ferdinand Regner
Centre de recherche FIM
Université d'Augsbourg
86159 Augsburg, Allemagne
ferdinand.regner@tum.de

André Schweizer Centre
de recherche FIM
Université de Bayreuth
95447 Bayreuth, Allemagne
andre.schweizer@fim-rc.de

Nils Urbach
Groupe de projet BISE du Fraunhofer FIT Université
de Bayreuth
95447 Bayreuth, Allemagne
nils.urbach@fim-rc.de

Résumé

Les jetons non fongibles (NFT) sont un nouveau type de jetons uniques et indivisibles basés sur la blockchain introduits fin 2017. Alors que les jetons fongibles ont permis de nouveaux cas d'utilisation tels que les Initial Coin Offerings, le potentiel des NFT en tant qu'élément de valeur reste flou. Cet article aborde cette lacune dans les connaissances théoriques et pratiques et démontre l'efficacité des NFT dans le domaine de la billetterie événementielle. Nous suivons une approche rigoureuse de la recherche en sciences de la conception en concevant, construisant et évaluant de manière approfondie un prototype de système de billetterie événementielle basé sur les NFT. Nous démontrons ainsi l'utilité des NFT pour tokeniser les biens numériques, prévenir la fraude et améliorer le contrôle des transactions sur le marché secondaire. En outre, nous apportons des connaissances généralisables sur les avantages et les défis des NFT et en déduisons des implications pour les chercheurs et les praticiens. Enfin, ce document propose des recommandations de gestion pour la création d'applications utilisant les NFT et permet à d'autres chercheurs de s'inspirer de ses conclusions et de ses principes de conception.

Mots-clés : Blockchain, tokenisation, contrat intelligent, jeton non fongible, billetterie

Introduction

La technologie blockchain est une innovation radicale qui a le potentiel de remettre en question, voire de remplacer, les modèles commerciaux existants qui reposent sur la confiance de tiers (Beck et Müller-Bloch, 2017). Le concept de blockchain a été introduit en 2008 par la publication du livre blanc du Bitcoin (Nakamoto, 2008) et a été principalement utilisé comme technologie derrière les crypto-monnaies au cours de ses premières années d'existence. En 2014, une deuxième génération de blockchains (par exemple Ethereum) a été introduite, qui permet de programmer et d'exécuter des logiciels - appelés contrats intelligents - sur tous les nœuds de blockchain participants. Par conséquent, tout utilisateur peut créer et déployer des programmes sur une infrastructure mondiale partagée (Buterin, 2014 ; Wood, 2014). Cela a conduit à la réalisation de nouveaux concepts conçus pour simplifier l'interaction humaine et la collaboration à grande échelle dans plusieurs industries (par exemple, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les paiements internationaux, le financement du commerce international, les marchés de l'énergie et les services notariaux) (Christidis et Devetsikiotis, 2016 ; Morabito, 2017 ; Wüst et Gervais, 2017). En particulier, les cas d'utilisation des Initial Coin Offerings (ICO) qui réinventent le crowdfunding grâce à l'utilisation de la blockchain et à sa capacité à tokeniser les actifs, attirent l'attention du public (Fridgen, Regner,

Schweizer et Urbach, 2018). Le succès spectaculaire des ICO, où l'on estime que 12 milliards de dollars ont été collectés à l'échelle mondiale, a été rendu possible par la norme ERC-20 (AutonomousNEXT, 2018). Cette norme, qui spécifie une interface commune pour les jetons fongibles qui sont divisibles et non distinguables, a été mutuellement acceptée par la communauté des développeurs afin de garantir l'interopérabilité (Vogelsteller, 2015).

En revanche, les jetons non fongibles (NFT) diffèrent des jetons fongibles par deux aspects importants. Chaque NFT est unique et ne peut être divisé ou fusionné (Voshmgir, 2018). Cette nouvelle forme de jeton a été introduite pour la première fois avec la norme ERC-721 fin 2017 (Entriken, Shirley, Evans et Sachs, 2018). L'ERC-721 diffère considérablement de la norme ERC-20, car elle étend l'interface commune pour les jetons par des fonctions supplémentaires afin de garantir que les jetons basés sur elle sont distinctement non fongibles et donc uniques (Entriken et al., 2018). Pour les praticiens, ces propriétés distinctes des NFT permettent une variété de nouveaux cas d'utilisation. Elles améliorent en particulier la tokenisation des actifs individuels, ce qui n'est pas réalisable avec des jetons fongibles, car ils ne peuvent pas représenter numériquement l'unicité. Ainsi, les praticiens ont mené une multitude d'expériences au cours des derniers mois en utilisant des NFT pour représenter à la fois des biens numériques tels que des actifs de jeux virtuels, des œuvres d'art numériques et des licences logicielles, ainsi que des biens physiques tels que des produits de luxe et des voitures (Butcher, 2018 ; Griffin, 2018). Les NFT sont considérés comme la clé pour débloquent le marché des objets de collection, dont la taille est estimée à 200 milliards de dollars (Fenech, 2018).

Cependant, outre l'existence de premiers cas d'utilisation expérimentale, une compréhension plus approfondie des NFT serait bénéfique du point de vue de la recherche en SI, et ce pour trois aspects principaux. Premièrement, une connaissance descriptive plus solide des caractéristiques générales des NFT et des différences avec les jetons fongibles permet de mieux comprendre les avantages et les possibilités qui en découlent. Deuxièmement, l'amélioration des connaissances normatives sur le processus de conception et d'évaluation des applications basées sur les NFT profite à la fois aux chercheurs et aux praticiens. Enfin, une meilleure connaissance des défis pratiques permet aux futurs chercheurs de mieux se concentrer sur la résolution des problèmes restants. Malheureusement, les chercheurs universitaires n'ont pas encore mené d'études approfondies sur les NFT concernant ces aspects. En outre, le corpus de connaissances actuel manque de meilleures pratiques, d'expérience en matière de projets de développement et d'idées sur le développement de logiciels basés sur la blockchain (Delmolino et al., 2016). Nous concluons donc qu'il existe une lacune évidente en matière de recherche. Nous visons à combler cette lacune en démontrant l'applicabilité des jetons non fongibles dans un domaine spécifique et en répondant à la question de recherche suivante : *Quels sont les avantages et les défis de l'utilisation pratique des jetons non fongibles ?*

Nous répondons à cette question en suivant une approche de recherche en science de la conception (DSR) et en développant le cas d'utilisation d'un système de billetterie d'événement. Ce faisant, nous présentons une nouvelle façon de créer, gérer, transférer et suivre les droits de propriété et d'utilisation impliqués. Nous avons choisi les billets comme exemple convaincant parce que 1) les solutions actuelles sont généralement confrontées à des problèmes tels que la fraude, la contrefaçon et le contrôle limité des transactions secondaires (Waterson, 2016), 2) en raison de la forte dépendance à l'égard de tiers pour la confiance, il existe un potentiel de perturbation grâce à la technologie blockchain (Beck et Müller-Bloch, 2017), et 3) le cas d'utilisation est limité dans sa portée et donc adapté à la construction d'un prototype DSR. Par conséquent, nous concevons et mettons en œuvre un prototype basé sur les NFT pour un système de billetterie événementielle décentralisé et basé sur la blockchain qui vise à remplacer les applications de billetterie centralisées existantes. En évaluant le prototype et son utilisation, nous obtenons des informations précieuses, découvrons des défis et tirons des conclusions qui permettent à un public orienté vers la technique et la gestion d'en bénéficier. La création et l'évaluation d'un prototype sont des activités centrales de l'approche DSR que nous suivons, qui a été adoptée à plusieurs reprises par des chercheurs en SI lorsqu'ils traitent de cas d'utilisation de la blockchain (Beck et al., 2016 ; Notheisen et al., 2017 ; Schweizer et al., 2017). En outre, la construction d'une instanciation dans un domaine spécifique est une pratique bien reconnue lorsqu'on est confronté à une nouvelle technologie (Hevner et al., 2004). Lindman et al. (2017) proposent spécifiquement le développement et l'analyse de prototypes basés sur la blockchain en utilisant une approche DSR. Comme une évaluation approfondie est essentielle pour prouver l'exactitude et l'applicabilité du prototype résultant, nous suivons une approche itérative de construction et d'évaluation (Hevner, 2007 ; Gregor et Hevner, 2013). En outre, nous nous appuyons sur la littérature existante et sur des entretiens avec des experts pour évaluer l'adéquation de l'artefact à l'objectif visé et pour mieux comprendre les avantages et les défis des NFT. Cette approche a prouvé sa pertinence et est conforme à diverses publications récentes dans le domaine de la blockchain et du DSR.

Nos contributions théoriques et nos implications pratiques sont triples : Premièrement, en créant un prototype fonctionnel comme artefact résultant, nous démontrons la faisabilité d'une solution basée sur la blockchain avec des NFT comme composant de base pour le domaine des systèmes de billetterie événementielle. Nous démontrons ainsi que de nombreux problèmes existants dans l'industrie de la billetterie, tels que la fraude, le manque de confiance et le contrôle limité sur les marchés gris secondaires, peuvent être surmontés en passant à une solution basée sur la blockchain qui utilise les NFT. Deuxièmement, en explorant les NFT d'un point de vue technologique et économique, nous générons des connaissances généralisables et des

des idées. Ainsi, nous apportons des connaissances à la fois descriptives et prescriptives au jeune domaine de recherche concernant les NFT. Étant donné que les connaissances théoriques sur les opportunités et les défis dans ce domaine sont rares et que les approches de meilleures pratiques font défaut, nous jetons les bases d'une recherche plus approfondie et d'une théorie plus élevée (Gregor, 2006 ; Glaser, 2017). Troisièmement, nous permettons aux praticiens d'avoir un aperçu d'un processus de construction efficace et d'améliorer leur compréhension des NFT et des conséquences associées à leur utilisation, y compris les avantages et les défis potentiels.

Le reste de ce document est structuré comme suit : La section suivante présente brièvement les NFT en tant que nouveau bloc de construction dans l'espace blockchain et les problèmes actuels dans le domaine de la billetterie. Ensuite, nous décrivons la méthodologie DSR à laquelle le document adhère afin de répondre à la question de recherche et de présenter l'application étape par étape. Nous décrivons ensuite l'artefact résultant et présentons son architecture logicielle et sa conception. L'avant-dernière section traite de l'évaluation et de la discussion des résultats obtenus avant de présenter notre conclusion dans le dernier chapitre.

Contexte

Blockchain et jetons non fongibles (NFT)

La blockchain est une technologie relativement nouvelle qui a d'abord gagné en popularité en tant que protocole derrière la crypto-monnaie Bitcoin, introduite en 2009 au plus fort de la crise financière (Nakamoto, 2008 ; Zohar, 2015). Au-delà de cette première instanciation et du cas d'utilisation des crypto-monnaies, une gamme plus large d'applications a vu le jour - une évolution principalement attribuée à la possibilité d'exécuter des morceaux de code logiciel sur une blockchain (Beck et al., 2016). Ces contrats intelligents (smart contracts), terme inventé par Nick Szabo en 1994, permettent à des parties qui ne se connaissent pas et ne se font pas confiance d'effectuer des transactions en toute sécurité. L'exécution correcte est garantie par un protocole de consensus qui s'exécute sur tous les nœuds participants de la blockchain sous-jacente et assure la cohérence (Szabo, 1994 ; Glaser, 2017 ; Sillaber et Walth, 2017).

Le premier et le plus populaire des protocoles de blockchain, qui prend en charge une machine virtuelle avec laquelle des langages de script complets Turing peuvent être exécutés, est Ethereum, qui a été introduit pour la première fois en 2014 (Buterin, 2014). Ethereum étant un protocole de blockchain public et sans autorisation, il permet à tout utilisateur de créer et de déployer des programmes sur son infrastructure mondiale partagée (Wood, 2014). Une communauté dynamique s'est développée pour exécuter une multitude de codes logiciels (contrats intelligents) sur la blockchain Ethereum. Pour favoriser l'interopérabilité, la communauté s'est mise d'accord sur de multiples normes au niveau des applications - appelées demandes de commentaires Ethereum (ERC) (Fondation Ethereum, 2018). La norme la plus connue, appelée ERC-20, spécifie une interface standardisée pour les jetons fongibles qui ont été largement utilisés pour donner à leurs détenteurs certains droits d'accès ou de gouvernance, et pour faciliter les ICO, une nouvelle forme de crowdfunding (Vogelsteller, 2015 ; Rohr et Wright, 2017). La popularité spectaculaire des ICO, qui ont permis de lever plus de 7 milliards USD en 2017 et plus de 12 milliards USD en 2018, a contribué à la popularité mondiale des jetons en général (AutonomousNEXT, 2018 ; Pichler, 2018). Une recherche sur Etherscan, un explorateur populaire de la blockchain Ethereum, renvoie à plus de 140 000 contrats de jetons déployés sur la chaîne principale publique Ethereum (Etherscan, 2018), ce qui indique que les jetons représentent un composant important pour les cas d'utilisation de la blockchain. Alors que les jetons fongibles, tels que les jetons basés sur la norme ERC-20, ont été largement utilisés, une nouvelle catégorie de jetons a été introduite fin 2017 avec la norme ERC-721. La norme ERC-721 spécifie une interface standardisée pour les *jetons* dits *non fongibles* (Entriken et al., 2018). La motivation derrière la création de cette nouvelle norme était qu'il existe une différence cruciale entre les jetons fongibles et les jetons non fongibles. Le terme *fongible* fait référence à l'interchangeabilité de chaque unité d'une marchandise avec d'autres unités de la même marchandise, c'est-à-dire que deux parties pourraient échanger le même montant sans gain ni perte. Alors que la fongibilité - la capacité à se substituer l'une à l'autre - est une caractéristique essentielle de toute monnaie, la non-fongibilité est l'inverse, car chaque jeton est distinctif et ne peut donc pas être divisé ou fusionné (Merriam-Webster, 2018 ; Voshmgir, 2018). Cela a également des implications pour le suivi de la propriété des jetons, car chaque NFT doit être suivi séparément. La norme ERC-721 précise que chaque NFT possède un identifiant unique au niveau mondial, qu'il est transférable et qu'il peut éventuellement inclure des métadonnées. Les NFT ont été créés dans un but précis : représenter la propriété d'actifs numériques ou physiques (Entriken et al., 2018). Bien que le concept de "pièces de couleur" en tant que représentation d'actifs réels sur la blockchain Bitcoin ait été discuté avant l'avènement d'Ethereum, la création de la norme ERC-721 a permis de concrétiser cette idée pour la première fois (Wang, 2017).

La première application basée sur les NFT à être largement adoptée a été un jeu virtuel en ligne appelé CryptoKitties. Ce jeu a absorbé plus de 70 % de la capacité de transaction du réseau Ethereum à un moment donné.

et le NFT le plus cher représentant la propriété d'un tel chat a été vendu pour plus de 100 000 USD fin 2017 (Tepper, 2017 ; AutonomousNEXT, 2018 ; Muzzy, 2018). Plus de 100 objets de collection numériques similaires, tels que des jeux de cartes virtuels ou des œuvres d'art numériques originales uniques, ont été créés par la communauté au cours de l'année écoulée et leur nombre devrait encore augmenter (Tomaino, 2018). Cependant, alors que les objets numériques n'ont sans doute de valeur que dans le contexte de leur écosystème, les NFT peuvent également contribuer à faciliter la tokenisation d'actifs du monde réel, tels que les œuvres d'art (Voshmgir, 2018). De multiples expériences sur la tokenisation de licences de logiciels, de produits de luxe et même de voitures grâce à l'utilisation de NFT ont été menées au cours des derniers mois (Butcher, 2018 ; Griffin, 2018). Le cabinet comptable EY a déclaré dans un communiqué de presse qu'il utilisait les NFT pour faciliter les transactions de capital-investissement (Khatri, 2018). Les NFT jouent également un rôle clé dans la mise à l'échelle de la capacité d'Ethereum à traiter un nombre élevé de transactions à l'aide de canaux étatiques (Coleman, Horne et Xuanji, 2018). Pourtant, malgré l'existence d'une multitude d'idées et d'expériences visant à utiliser les NFT pour une variété de cas d'utilisation supplémentaires, tels que la tokenisation des certificats éducatifs comme les diplômes universitaires, l'application des droits d'auteur, le suivi de la chaîne d'approvisionnement ou les procédures de connaissance du client (KYC), les études évaluées par des pairs traitant du sujet restent rares (Voshmgir, 2018). Aucune étude empirique sur l'utilisation des NFT n'étant disponible à ce jour, les avantages et les défis restent largement inexplorés. Bien que les NFT n'aient pas de valeur en soi, elles peuvent permettre de nouveaux cas d'utilisation qui n'étaient pas possibles jusqu'à présent et créer de l'utilité pour les utilisateurs (Sparango, 2018). Nous considérons donc les NFT comme des blocs de construction potentiellement utiles et utilisons un cas d'utilisation spécifique pour vérifier si cette hypothèse est valable et pour obtenir un aperçu théorique et pratique de l'utilisation, des avantages et des défis.

Systèmes de billetterie événementielle

Les billets représentent un mécanisme permettant de démontrer le droit d'accès à tout événement, qu'il soit sportif ou culturel. Ils se présentent sous de nombreuses formes, allant du papier physique aux codes lisibles électroniquement sur papier ou aux puces intégrées dans des cartes à puce ou des bracelets (Waterson, 2016). Les billets peuvent être achetés sur le marché primaire directement auprès de l'organisateur de l'événement ou de vendeurs autorisés tels que des agents désignés, la plupart du temps à un prix fixe. Il existe également des marchés secondaires, à la différence notable que n'importe quel prix peut être pratiqué et que les acheteurs et les vendeurs s'engagent souvent directement dans les affaires ou s'appuient sur des plateformes de vente de billets secondaires, qui prélèvent généralement 25 à 30 % des ventes secondaires sous forme de frais (Waterson, 2016). La revente de billets est une activité en pleine croissance au niveau mondial, qui représente un chiffre d'affaires de 8 milliards de dollars par an (Courty, 2017). Toutefois, si les plateformes et les tiers tirent leur épingle du jeu, le statu quo n'est pas satisfaisant pour les deux principales parties prenantes - l'organisateur de l'événement et le client - comme le montrent les nombreuses plaintes déposées auprès des agences de protection des consommateurs (McMillan, 2016 ; Courty, 2017 ; NZ Herald, 2017). Les consommateurs doivent faire confiance à des tiers lorsqu'ils achètent des billets sur les marchés secondaires et sont donc confrontés au risque d'acheter des billets frauduleux ou invalidés, qui sont des contrefaçons ou peuvent être annulés (The Australian Government the Treasury, 2017). L'utilisation de codes QR ou de codes-barres, qui codent les informations mais ne les cryptent pas, ne suffit pas à rendre les billets réellement inviolables. En outre, les consommateurs n'ont pas la possibilité de vérifier si le code-barres figurant sur leur billet est valide. Dans plusieurs cas, les mêmes codes-barres ont été vendus plusieurs fois ou ont été obtenus en les extrayant des photos d'un billet mis en ligne (Tackmann, 2017). Le problème de la fraude aux billets n'est pas vraiment mineur : on estime que 12 % des acheteurs de billets se font arnaquer, ce qui représente un préjudice annuel estimé à 2 milliards USD (Waterson, 2016 ; Leonhart, 2018).

Les prix des billets sur les marchés secondaires sont poussés à l'extrême, en partie grâce à l'utilisation de bots qui font automatiquement grimper les prix pour réaliser un profit en les revendant avec les marges les plus élevées possibles (Courty, 2017). Ainsi, de nombreux gouvernements envisagent d'interdire purement et simplement la revente de billets à des fins lucratives, mais les économistes restent sceptiques quant à l'interdiction pure et simple de la revente (Courty, 2017). Du point de vue de l'organisateur de l'événement, le contrôle limité des transactions secondaires constitue un problème majeur. L'utilisation de codes statiques sur les billets ne permet pas de relier un billet à son propriétaire en cas de revente, et il n'est pas non plus souhaitable de lier strictement un billet à une personne et d'en interdire complètement la revente, car des contrôles d'entrée coûteux et chronophages doivent être effectués (Waterson, 2016). En résumé, le manque de transparence et de confiance est évident, et les parties prenantes sont actuellement à la recherche de solutions efficaces pour résoudre ce problème (Waterson, 2016 ; Tackmann, 2017).

En recherchant des projets actuels dans le domaine des systèmes de billetterie événementielle, nous avons trouvé des propositions d'idées et des projets en phase de démarrage impliquant la technologie blockchain de la part d'entreprises telles qu'Avantis, GET Foundation et IBM (GET, 2017 ; Tackmann, 2017 ; Avantis, 2018). Cependant, une première analyse de ces solutions proposées a révélé que chacune d'entre elles repose sur des jetons fongibles et que les caractéristiques principales ne sont pas construites sur un grand livre immuable, mais plutôt hors chaîne par l'entreprise. Cela signifie que les billets ne sont pas vraiment représentés par des identifiants uniques sur une blockchain sans confiance et que l'amélioration potentielle en utilisant les NFT comme composant principal doit encore être évaluée. Les problèmes des marchés secondaires dans le domaine de la billetterie sont les suivants

prototypiques et s'appliquent à de nombreuses autres industries. La littérature actuelle suggère que les industries qui dépendent fortement de tiers pour la confiance sont une cible potentielle pour la perturbation par la technologie blockchain (Beck et Müller-Bloch, 2017).

Méthode de recherche

Pour concevoir, mettre en œuvre et évaluer un prototype de système de billetterie événementielle blockchain, nous suivons une approche DSR. L'approche DSR, historiquement issue de l'ingénierie, implique la création d'un artefact qui n'a jamais existé auparavant et qui sert un objectif humain significatif (March et Smith, 1995). Les caractéristiques typiques de ces efforts de recherche sont une forte dépendance à l'égard de la créativité et de la recherche par essais et erreurs (Hevner et al., 2004). Dans le contexte du DSR, la création d'un prototype représente une instanciation d'un artefact informatique basé sur la blockchain (March et Smith, 1995). Grâce à l'instanciation de l'artefact, nous démontrons à la fois la faisabilité du processus de conception et du produit conçu et nous permettons aux chercheurs d'en apprendre davantage sur l'effet de l'artefact dans le monde réel et sur son utilisation appropriée (Hevner et al., 2004). Cette approche a été adoptée à plusieurs reprises par des chercheurs en SI lorsqu'ils ont traité de nouveaux aspects de la technologie blockchain (Beck et al., 2016 ; Notheisen et al., 2017 ; Schweizer et al., 2017).

Hevner et al. (2004) énumèrent sept lignes directrices pour l'application de la DSR dans le domaine de la société de l'information : Elle nécessite la création d'un artefact innovant qui remplit un objectif spécifique (1) pour un domaine de problèmes spécifié (2). Il est essentiel d'évaluer minutieusement l'artefact pour déterminer s'il apporte une solution au problème spécifié (3). Une contribution claire et vérifiable, telle que la résolution d'un problème non résolu ou la résolution d'un problème connu d'une manière plus efficace ou plus efficiente, est également obligatoire (4). Cela nécessite une définition rigoureuse, une représentation formelle, une cohérence et une consistance interne de l'artefact (5). Grâce à la création de l'artefact, nous construisons un espace de problème tout au long du processus et une méthode pour trouver une solution efficace (6). Enfin, nous devons communiquer les résultats de manière efficace (7). Dans le tableau 1, nous présentons notre approche pour répondre à ces sept lignes directrices.

Lignes directrices	Contribution
La conception en tant qu'artefact	Le prototype que nous construisons dans le cadre de nos recherches instancie un artefact basé sur la NFT qui permet la création, la gestion et les transactions sans confiance de billets d'événements.
Pertinence du problème	Nous comblons une lacune dans la littérature scientifique en ce qui concerne la question de savoir si les NFT sont adaptés à la représentation d'actifs numériques rares (tels que les billets d'événement) et nous essayons en outre de mieux comprendre les avantages et les défis liés à l'utilisation des NFT, qui doivent encore être déterminés par les chercheurs. En ce qui concerne le cas d'utilisation des billets d'événement, nous visons à résoudre les problèmes de fraude, de manque de confiance, de manque de contrôle sur les transactions du marché secondaire, de faible transparence et de forte dépendance à l'égard des intermédiaires.
Évaluation de la conception	Pour évaluer le prototype en termes de fonctionnalité, de complétude formelle, de cohérence, de précision, de fiabilité et d'efficacité, nous suivons l'approche de Hevner et al. 2004, selon laquelle l'objectif premier est de montrer que (1) la solution fonctionne (preuve par construction) et (2) de caractériser les environnements dans lesquels elle fonctionne (scénarios illustratifs).
Contributions à la recherche	Notre contribution consiste à démontrer l'utilité des NFT dans le domaine des billets d'événements avec une rigueur scientifique. Grâce à l'instanciation de l'artefact, nous démontrons la faisabilité du processus de conception et du produit conçu et nous permettons aux chercheurs d'en apprendre davantage sur l'effet de l'artefact dans le monde réel et sur son utilisation appropriée (Hevner et al., 2004). En outre, nous visons à jeter les bases d'une recherche plus approfondie et d'une théorie plus élevée dans le domaine des NFT et du développement d'applications basées sur la blockchain (Gregor, 2006 ; Glaser, 2017).
Rigueur de la recherche	Comme le montre ce tableau, nous suivons de près les lignes directrices de Hevner et al. (2004) concernant le processus de DSR dans les SI. En outre, nous nous inspirons des meilleures pratiques d'autres chercheurs en SI qui ont traité des approches similaires lors de l'évaluation de nouveaux aspects de la technologie blockchain (Beck et al., 2016 ; Notheisen et al., 2017 ; Schweizer et al., 2017). Pour déterminer si la conception de notre artefact est complète, nous suivons une stratégie de satisfaction, ce qui signifie que la solution est satisfaisante en ce qui concerne la résolution des exigences et des contraintes du problème que nous énonçons pour le cas d'utilisation sélectionné (Hevner et al., 2004).

La conception comme processus de recherche	Nous suivons une approche itérative de construction et d'évaluation. Pour mieux évaluer l'adéquation de l'artefact à l'objectif visé et obtenir un aperçu des avantages et des défis, nous nous appuyons également sur la littérature existante dans le domaine des applications et des solutions, comme le suggèrent Hevner et al. (2004), et nous réalisons des entretiens semi-structurés avec des experts (Schultze et Avital, 2011). La littérature évaluée par les pairs étant rare dans ce nouveau domaine de recherche, nous utilisons également des sources Internet accessibles au public, telles que des référentiels de code source ouvert, des livres blancs et des articles de blog, ce qui renforce notre connaissance du domaine et garantit l'actualité de ce document.
Communication de la recherche	Nous visons à fournir des informations claires à la fois au public orienté vers la gestion et au public orienté vers la technique. Le premier bénéficie du diagramme UML schématique et du raisonnement théorique sur les avantages et les défis, tandis que pour le second, nous publions l'intégralité du code source du projet sur GitHub, y compris tous les tests formels. Cela permet aux chercheurs techniques et aux praticiens de reproduire notre travail et/ou de s'en inspirer.

Tableau 1. Correspondance entre les lignes directrices sur le RSD de Hevner et al. (2004) et nos contributions

Conception et développement de prototypes

Dans cette section, nous présentons la conception et le développement de notre système de billetterie événementielle basé sur la blockchain conformément aux lignes directrices du DSR de Hevner et al. (2004). Tout d'abord, nous décrivons brièvement l'énoncé du problème vérifié et les objectifs de conception du prototype. Ensuite, nous élaborons la décision de conception fondamentale qui a conduit au choix de la blockchain Ethereum et des NFT comme composants de base du prototype. Enfin, nous présentons une vue d'ensemble de la conception du prototype qui en résulte et expliquons brièvement son application.

Énoncé du problème et détermination des objectifs de la conception

Notre analyse documentaire a révélé les problèmes actuels du secteur de la billetterie événementielle. Pour résumer nos conclusions, le statu quo n'est pas satisfaisant pour les deux principales parties prenantes - l'organisateur de l'événement et le participant, comme le montrent les nombreuses plaintes déposées auprès des agences de protection des consommateurs (McMillan, 2016 ; Courty, 2017 ; NZ Herald, 2017). Conformément au cycle de pertinence défini par Hevner (2007), nous avons en outre validé nos conclusions en interrogeant le PDG d'une société de billetterie, qui nous a fait bénéficier de ses précieuses connaissances d'expert. Il a largement confirmé nos résultats préliminaires et a ajouté qu'il serait souhaitable que les organisateurs d'événements interagissent directement avec les participants aux événements plutôt que de devoir compter sur des intermédiaires pour la confiance et qu'un protocole ouvert serait préférable au statu quo opaque. Le tableau 2 résume brièvement les principaux problèmes identifiés.

Domaine du problème	Description
Manque de confiance	Les consommateurs doivent faire confiance à des tiers lorsqu'ils achètent des billets sur les marchés secondaires et sont donc confrontés au risque d'acheter des billets frauduleux ou invalidés, qui risquent d'être annulés ou qui sont des contrefaçons (The Australian Government the Treasury, 2017).
Pas de contrôle sur les prix du marché secondaire	Les prix des billets des consommateurs sur les marchés secondaires sont poussés à l'extrême, en partie grâce à l'utilisation de bots qui font automatiquement grimper les prix pour réaliser un profit en les revendant avec les marges les plus élevées possibles (Courty, 2017). Du point de vue de l'organisateur de l'événement, le contrôle limité des transactions secondaires constitue un problème majeur.
Dépendance à l'égard des intermédiaires	Les organisateurs d'événements dépendent d'intermédiaires et supportent des risques financiers tout en étant coupés des bénéfices exceptionnels et des relations directes avec les participants à l'événement.
Pas de validation immédiate	Les participants ne peuvent pas facilement vérifier la validité de leurs billets (Tackmann, 2017).
Manque de transparence	Le manque de transparence du marché secondaire est évident dans le secteur de la billetterie événementielle (Waterson, 2016)

Tableau 2. Aperçu des domaines problématiques identifiés

Sur la base de ces résultats et d'autres documents, nous avons défini les objectifs de conception souhaités pour le prototype. Conformément au cycle de pertinence proposé par Hevner (2007), nous avons défini nos objectifs de conception et les critères d'acceptation ultérieurs pour l'évaluation des résultats de la recherche sur la base de Hevner et al. (2004). Le tableau 3 présente les objectifs de conception et les critères et méthodes d'évaluation proposés.

Objectif de la conception	Description	L'évaluation
1. Numérisation 1.1. Stockage numérique de toutes les données 1.2. Échange numérique de toutes les données	La portabilité des billets indépendamment d'un support physique doit être assurée (Fujimura et al., 1999). Toutes les données doivent être stockées et échangées de manière purement numérique (Nærland, Müller-bloch, Beck et Palmund, 2017).	Validation de l'efficacité et de l'exhaustivité par des méthodes de simulation et de description.
2. Contrôle des transactions sur le marché secondaire 2.1. Gestion des transactions 2.2. Prix plafonds 2.3. Facturer des frais de transaction	L'organisateur de l'événement doit être en mesure de gérer la transaction des billets et de percevoir des frais de transaction sur tout transfert de billets payés entre les participants. Les politiques de gestion doivent être déterminées par l'émetteur du billet (Fujimura et al., 1999). Il peut s'agir d'interrompre toutes les transactions et de plafonner le prix des billets pour les transactions sur le marché secondaire.	Analyse fonctionnelle du prototype afin d'évaluer l'efficacité et la fiabilité par le biais d'essais et de simulations.
3. Indépendance 3.1. Décentralisation 3.2. Confiance	Aucun courtier ou autorité centralisée ne doit être chargé de vendre les billets (Fujimura et al., 1999). Les organisateurs d'événements doivent être en mesure de mener leurs activités indépendamment des parties intermédiaires.	Évaluation de l'efficacité et de la validité par le biais de tests et d'une évaluation descriptive.
4. Sécurité 4.1. Disponibilité 4.2. Intégrité 4.3. Vie privée	Un environnement sécurisé se caractérise par l'accessibilité des ressources (disponibilité), l'authenticité des données (intégrité) et la prévention de l'accès aux utilisateurs illégitimes (confidentialité) (Vacca, 2013).	La cohérence et la fiabilité doivent être vérifiées au moyen d'essais, de simulations et d'évaluations descriptives.
5. Validation 5.1. Vérification de la propriété	Pour renforcer la confiance dans l'intégrité du système, la propriété des billets doit pouvoir être vérifiée de manière simple et à tout moment.	Essais fonctionnels et simulation pour évaluer la fiabilité.
6. Transparence 6.1. Voir le nombre de billets en circulation 6.2. Accès à l'historique des transactions	L'historique des transactions de billets doit être totalement transparent. Le statut de propriété actuel et tout changement d'état, depuis la création et les transferts entre participants jusqu'à la fin du cycle de vie, doivent être accessibles au public.	Analyse de la précision et de l'exhaustivité par des méthodes de simulation et de description.
7. Automatisation 7.1. Aucune interaction manuelle n'est nécessaire après l'installation	L'organisateur de l'événement ne devrait pas avoir à effectuer d'action manuelle après la configuration initiale. Toute politique définie par l'organisateur doit être appliquée automatiquement.	La fonctionnalité et la fiabilité doivent être évaluées par des essais et des simulations.
8. Rapport coût-efficacité 8.1. Structure de coûts efficace	Les coûts fixes et variables du système doivent être économiques du point de vue de l'organisateur de l'événement.	Évaluation de l'efficacité par la simulation.

Tableau 3. Objectifs de la conception

Décisions fondamentales en matière de conception

Une architecture de système bien conçue fournit la feuille de route pour le processus de développement ultérieur (Nunamaker, Chen et Purdin, 1990). Avant d'essayer d'appliquer immédiatement une solution basée sur la blockchain, nous nous sommes d'abord assurés que nos décisions de conception fondamentales étaient bien fondées. Ainsi, nous avons suivi le modèle de décision de Wüst et Gervais (2017), qui aide à décider si l'utilisation de la technologie blockchain est utile pour une

scénario spécifique. Il guide l'utilisateur à travers des critères de décision séquentiels sous forme de questions. Comme la réponse à la question clé de savoir si toutes les parties en interaction peuvent être intrinsèquement dignes de confiance a été clairement négative, une solution de type blockchain est conseillée selon le modèle. Comme nous avons répondu positivement à la question de suivi, à savoir si une vérification publique est nécessaire, le modèle conseille d'utiliser une blockchain publique sans permission. Nos objectifs de conception ont fourni une ligne directrice précieuse pour sélectionner une blockchain présentant les caractéristiques souhaitées. La blockchain Ethereum est une blockchain publique et sans permission qui prend en charge les contrats intelligents, dispose de la plus grande communauté de développeurs et repose sur plus de 60 000 nœuds qui gèrent le réseau sans point central de défaillance (Beck et al., 2016). Ces propriétés nous ont permis de construire une application automatisée qui hérite des caractéristiques clés de la blockchain sous-jacente, telles que la confiance décentralisée, l'intégrité, la transparence, la non-répudiation et la disponibilité. Ethereum a développé ses propres langages de programmation de haut niveau qui se compilent en bytecode pouvant être exécuté sur la machine virtuelle Ethereum ; son plus populaire étant *Solidity* qui présente une syntaxe de type JavaScript (Tikhomirov, 2018). Ainsi, nous avons choisi de développer le code du contrat intelligent pour le prototype dans Solidity. Nous nous sommes appuyés sur le cadre de développement *Truffle*, qui contient des outils pour le déploiement de contrats et la bibliothèque de test *Mocha* ainsi que *ganache-cli*, qui fournit une blockchain Ethereum locale pour les tests (Truffle, 2019). En outre, *Infura* permet d'accéder à des réseaux de test Ethereum publics tels que *Ropsten* sans que nous ayons à mettre en place notre propre nœud Ethereum complet (Consensys, 2019). Cette boîte à outils s'est avérée essentielle pour un développement efficace, qui se caractérise par le fait d'être axé sur les tests et des itérations rapides (Janzen et Saiedian, 2005). Chacun de ces choix est bien reconnu et bien testé dans la communauté de la blockchain, avec plus d'un million d'utilisateurs chacun (Mougayar, 2018). Nous avons utilisé les NFT comme composant de base fondamental de notre prototype, car ils contribuent à la réalisation de nos objectifs de conception grâce à leurs propriétés d'unicité, d'indivisibilité et de transférabilité (Entriken et al., 2018). Nous avons réutilisé l'implémentation bien testée, audité et revue par la communauté de la norme ERC-721 par *OpenZeppelin*, que nous étendons par des fonctions supplémentaires nécessaires à notre cas d'utilisation spécifique (OpenZeppelin, 2019).

Prototype résultant

En respectant les objectifs et les choix de conception que nous avons spécifiés, nous avons construit un prototype qui répond aux préoccupations de l'organisateur de l'événement et des participants. En suivant le cycle de DSR présenté dans la section précédente, nous avons adopté une approche interactive et commencé par une conception très basique pour résoudre un problème très simplifié et abstrait. Après évaluation des résultats préliminaires et de la performance des tests unitaires, nous avons affiné les exigences et la conception nécessaire pour résoudre le problème. Le prototype qui en résulte doit être considéré comme une implémentation de base qui se concentre sur les caractéristiques essentielles nécessaires pour atteindre les objectifs de conception que nous avons spécifiés. La figure 1 présente un diagramme UML qui décrit les principales fonctions du prototype.

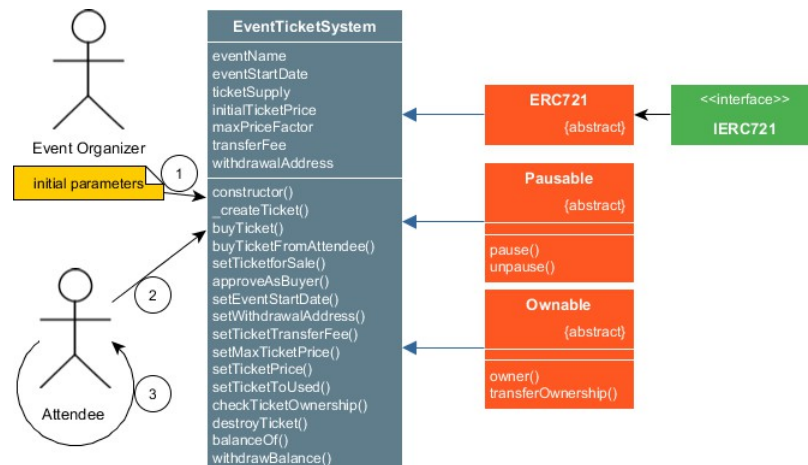


Figure 1. Diagramme UML (simplifié)

Comme le montre le diagramme UML, les deux seules entités participant au processus simplifié sont l'organisateur de l'événement et les participants à l'événement. Ils font des affaires uniquement en interagissant avec le contrat intelligent - le besoin d'un intermédiaire est complètement éliminé. La seule exigence pour les deux parties est de posséder un compte sur la blockchain Ethereum, alimenté par une partie de sa crypto-monnaie native, l'Ether, pour interagir avec le contrat intelligent. La séquence d'interactions est numérotée de 1 à 3, comme le montre le diagramme.

(1) Phase d'installation : Tout d'abord, les organisateurs d'événements déploient un contrat intelligent pour un événement spécifique. Les paramètres initiaux, tels que le nom de l'événement, le prix initial des billets, le prix maximum des billets, la date de début de l'événement, le nombre maximum de billets disponibles et les frais de transaction initiaux pour les transactions de billets secondaires sont fournis au *constructeur()* comme spécifié dans le script de déploiement du contrat. La figure 2 présente une capture d'écran du journal de la console pendant le déploiement d'un exemple d'événement. L'organisateur de l'événement est le propriétaire du contrat intelligent et peut donc modifier ces paramètres ultérieurement en interagissant avec le contrat intelligent, en plus de retirer son solde et d'interrompre les transactions de billets à tout moment.

```
2_deploy_contracts.js
=====
Deploying contract for event  MyConcert ( MC ) on  7/7/2020
A maximum of 100 tickets are available
The initial ticket price is 1 ETH
Ticket prices are only allowed to be a factor of 2 of the initial ticket price
The ticket transfer fee between attendees is set to  20 % of the ticket price

Deploying 'EventTicketSystem'
-----
> transaction hash:  0xd9ec4c3fa95851bc342f92bf6bd9b86f1c34859cb32b514594de7b6089b6c6f1b
> Blocks: 1          Seconds: 9
> contract address:  0x672D4930a2425B94553843a057a2f3b14681C8E3
```

Figure 2. Journal de bord du déploiement d'un contrat sur le réseau de test Ropsten

(2) Marché primaire : Après le déploiement du contrat, les participants à l'événement peuvent acheter des billets jusqu'à ce que la limite de l'offre soit atteinte, en envoyant une transaction contenant de l'Ether à la fonction payable *buyTicket()*. La fonction vérifie d'abord si le montant transféré est suffisant, puis appelle la fonction interne *_createTicket()* qui "frappe" un nouveau NFT qui agit comme la représentation virtuelle d'un billet. Chaque ticket est unique car son identifiant ne peut exister qu'une seule fois par contrat et sa propriété peut être vérifiée à tout moment en appelant la fonction *checkTicketOwnership(id)*. Le nombre total de billets possédés peut être obtenu en appelant *balanceOf()*.

(3) Marché secondaire : Les propriétaires de billets peuvent proposer leurs billets à la revente en appelant la fonction *setTicketForSale()*. Ils peuvent utiliser la fonction *setTicketPrice()* pour facturer un prix qui ne dépasse pas le prix maximum défini par l'organisateur de l'événement. Tout utilisateur ayant accès à un navigateur web compatible avec la blockchain peut acheter des billets auprès des propriétaires de billets actuels une fois que l'approbation a été donnée par le propriétaire du billet par l'appel de *approvedAsBuyer()*. L'acheteur peut maintenant transférer le montant requis de crypto-monnaie à la fonction payable *buyTicketFromAttendee()*, qui transfère finalement le billet à l'acheteur. Les frais de transaction fixés par l'organisateur de l'événement sont automatiquement déduits et conservés par le contrat, où ils ne peuvent être retirés que par le propriétaire du contrat. Une fois que l'événement a commencé, le modificateur *EventNotStarted()* interdit l'utilisation de toute fonction de définition. Ainsi, aucun billet ne peut plus être créé ou transféré après l'heure spécifiée dans *eventStartDate*. L'organisateur peut appeler *setTicketToUsed()* pour valider un billet sur le lieu de l'événement.

Bien que la portée de ce prototype ne comporte pas d'interface pour les utilisateurs au détail, sa compatibilité totale avec la norme ERC-721 permet aux utilisateurs d'utiliser n'importe quel portefeuille compatible ou des places de marché NFT comme OpenSea pour faciliter les transactions peer-to-peer d'une manière simple (OpenSea, 2019). Le prototype est déployé sur le réseau de test Ethereum *Ropsten* et permet donc à tout utilisateur ayant accès à un nœud Ethereum d'invoquer le contrat intelligent et de l'utiliser. Le code source du prototype mis en œuvre, y compris les instructions de déploiement, est accessible au public sur ^{GitHub}¹.

Évaluation et discussion

Pour l'évaluation, nous avons relié le prototype obtenu aux objectifs de conception et aux critères d'évaluation (voir tableau 3). Notre évaluation ne se limite pas à une activité unique menée à la fin de la phase de construction, mais représente plutôt un processus itératif et englobe de multiples méthodes et perspectives (Pries-Heje, Baskerville et Venable, 2008).

Essais et évaluation expérimentale

Pour une analyse approfondie de la fonctionnalité, de la structure, de l'exhaustivité formelle, de la cohérence et de la qualité de notre prototype, nous nous sommes appuyés sur des tests algorithmiques en boîte blanche, tels que les tests unitaires (Hevner et al., 2004). Pour affiner et optimiser notre prototype, nous avons suivi une approche pilotée par les tests et avons procédé par itération entre les tests et les améliorations (Janzen et Saiedian, 2005). Nous avons utilisé le cadre Truffle qui contient la bibliothèque de tests Mocha et le logiciel

¹ <https://github.com/ratio91/NFT-event-tickets>

Bibliothèque d'assertions Chai pour les tests structurels, les tests unitaires et les tests fonctionnels (Truffle, 2019). Pour assurer la cohérence et la qualité de chaque fonction publique et de tous les modificateurs que notre prototype contient, nous avons écrit plusieurs tests unitaires. En outre, nous avons créé une série de tests d'intégration pour simuler le flux de travail complet, ce qui nous a permis de tester l'exhaustivité formelle et la fonctionnalité de notre prototype. Au total, nous avons créé 33 tests sur 289 lignes de code JavaScript pour nous assurer que notre prototype se comporte correctement lors des changements d'état. Un test réussi avec des données artificielles, simulant la réalisation entièrement automatisée de l'ensemble du processus décrit dans la section précédente, sert donc de preuve de construction et montre que notre solution fonctionne (Nunamaker et al., 1990). En outre, la simulation du scénario de test réaliste a permis d'estimer le coût du déploiement du système à 5 millions de gaz. Outre l'exécution de tests et de simulations, nous avons également utilisé le code linter *Solhint* et corrigé tous les problèmes signalés (Protofire, 2019). Pour éviter les failles de sécurité et les défauts potentiels dans notre code, nous avons recherché la littérature récente couvrant les questions de sécurité pour les contrats intelligents, comme Atzei et al. (2017) et Fröwis et al. (2017), et nous avons modifié notre code si nécessaire (par exemple, en définissant certaines fonctions publiques comme privées). Pour permettre à d'autres chercheurs ou praticiens de vérifier notre prototype et de l'améliorer, nous avons mis en open source l'ensemble du projet.

Évaluation des experts

Outre les simulations et les essais, nous nous sommes appuyés sur d'autres sources telles que la littérature pertinente et les entretiens avec des experts pour formuler des arguments éclairés (Hevner et al., 2004). Pour évaluer notre artefact et discuter de différents scénarios concernant les implications pour notre prototype et les NFT en général, nous avons sélectionné neuf experts ayant des antécédents différents en fonction de leurs connaissances préalables des NFT et de la billetterie événementielle, comme le montre le tableau 4.

Id	Brève description	Position actuelle
1	Consultant blockchain spécialisé dans la tokenisation d'actifs	Associé directeur, société de conseil
2	Expert en matière d'applications mobiles de billetterie	PDG, société de logiciels de billetterie
3	Analyste technologique spécialisé dans l'industrie de la blockchain	Analyste, société de capital-risque
4	Chercheur en blockchain spécialisé dans les écosystèmes de jetons	Candidat au doctorat, Université
5	Un chercheur en sciences de l'information se concentre sur la recherche sur l'identité basée sur la blockchain	Chercheur, Institut de recherche
6	Chercheur en économie comportementale spécialisé dans la blockchain	Candidat au doctorat, Université
7	Conseiller technique spécialisé dans les prototypes de blockchain	Consultant senior, cabinet de conseil
8	Programmeur blockchain spécialisé dans la tokenisation des actifs.	Développeur, startup blockchain
9	Gestionnaire de fonds de capital-risque axé sur la blockchain.	MP, Société de capital-risque

Tableau 4. Entretiens avec les experts

Nous avons présenté notre recherche à tous les experts au préalable et avons suivi un guide d'entretien semi-structuré (Holstein et Gubrium, 1995). Nous avons enregistré numériquement les entretiens et les avons analysés par la suite conformément aux normes scientifiques (Schultze et Avital, 2011). Nos entretiens se composaient de deux parties principales et duraient généralement environ 30 minutes. Tout d'abord, nous nous sommes concentrés sur l'approche d'évaluation descriptive recommandée, qui consiste à évaluer l'efficacité et l'utilité d'un artefact en créant des scénarios illustratifs autour de celui-ci (Hevner et al., 2004 ; Akoka, Comyn-Wattiau, Prat et Storey, 2017). Nous avons discuté de l'adéquation de notre prototype avec les objectifs de conception spécifiés et avons invité les personnes interrogées à proposer des scénarios réalistes et à explorer les implications pour notre prototype. Deuxièmement, nous avons également posé des questions ouvertes pour permettre une discussion ouverte sur les aspects généraux des NFT. Voici quelques exemples de questions :

- Comment peut-on, à votre avis, généraliser les implications des NFT dans le cas d'utilisation discuté ?
- Quels sont, selon vous, les principaux avantages des NFT ?
- Selon vous, quels sont les inconvénients de l'utilisation des NFT ?
- Quels sont les défis qui subsistent et comment pourraient-ils être relevés à l'avenir ?

En fonction de la formation technique de la personne interrogée, nous avons également inclus des questions analytiques concernant la perception de l'adéquation de notre prototype avec l'architecture technique existante des systèmes d'information (Hevner et al., 2004).

Résultats de l'évaluation et discussion

DO1 - Numérisation : Notre simulation révèle que l'ensemble du flux de travail peut être traité sans qu'aucune représentation physique des données ne soit nécessaire. La numérisation complète est réalisable en principe, en particulier pour le processus d'achat et de vente des billets [expert n° 5]. Toutefois, il est conseillé de prévoir des mécanismes de secours pour les utilisateurs moins avertis, tels que la génération de codes QR qui encodent l'identifiant du billet. L'utilisateur pourrait alors décider d'imprimer le billet ou de le montrer numériquement sur son téléphone [expert n° 1].

DO2 - Marchés secondaires : Les NFT nous permettent d'intégrer la logique dans les actifs numériques tels que les billets d'événement eux-mêmes, plutôt que dans les applications qui contrôlent les actifs. Le prototype montre que l'intégration de règles commerciales pour le transfert de billets d'événements fonctionne et permet aux organisateurs d'événements de garder le contrôle du processus, de fixer des limites de prix et de facturer aux vendeurs de billets une redevance définie. Une logique codée en dur est supérieure à la gouvernance ou à la réglementation qui nécessite la surveillance du comportement réel des utilisateurs et l'application des règles par des acteurs humains (Waltl, Sillaber, Gellersdörfer et Matthes, 2019). Il est beaucoup plus facile de percevoir des frais auprès du vendeur d'un billet s'ils sont automatiquement déduits ou d'empêcher complètement les transactions, plutôt que d'exiger du vendeur, par la loi, qu'il obéisse à certaines règles (Davidson, Novak et Potts, 2018). Ainsi, nous considérons que le prototype est à la fois plus efficace et plus efficient que les moyens actuellement existants pour contrôler les transactions sur le marché secondaire. La seule faiblesse que nous avons découverte est un scénario, où les utilisateurs contournent complètement le système en transférant la clé privée d'un compte Ethereum qui possède un billet d'événement lui-même, plutôt que d'échanger le billet au sein du système [expert #6, #7]. Cela pourrait être évité par la mise en œuvre de mesures KYC, qui vérifient l'identité d'un utilisateur d'une adresse blockchain [expert #6, #7]. Le KYC lui-même est un sujet brûlant parmi les praticiens et les chercheurs à l'heure actuelle et pourrait également être réalisé à l'aide d'un système basé sur la blockchain (Parra Moyano et Ross, 2017).

DO3 - Indépendance : Pour devenir indépendants des intermédiaires, les organisateurs d'événements et les participants ont besoin d'un système qui fonctionne sans confiance. Grâce à la technologie blockchain, les utilisateurs peuvent faire confiance aux règles qui sont appliquées automatiquement et ne peuvent pas être manipulées (Beck et al., 2016). Étant donné que chaque nœud Ethereum traite et valide les transactions de manière indépendante, la seule confiance requise concerne le protocole blockchain sous-jacent (Glaser, 2017). Toutefois, l'absence de confiance n'est pas seulement une propriété de la plateforme, mais aussi de chaque contrat intelligent (Fröwis et Böhme, 2017). Nos interlocuteurs s'accordent généralement à dire que l'indépendance vis-à-vis des intermédiaires peut être obtenue et que l'objectif de conception est atteint. Cependant, plusieurs experts ont souligné que le cas d'utilisation le plus réaliste pour notre prototype basé sur les NFT serait l'intégration avec des plateformes existantes pour bénéficier de l'agrégation des utilisateurs. Les dépendances existantes vis-à-vis des intermédiaires sont remplacées par une nouvelle dépendance vis-à-vis d'intermédiaires techniques tels que les développeurs de contrats intelligents [expert n° 5].

DO4 - Sécurité : Notre recherche documentaire a révélé que la sécurité d'un système basé sur la blockchain dépend de la sécurité générale du protocole blockchain sous-jacent et de la sécurité des contrats intelligents individuels. Le premier est confronté à des risques de sécurité tels qu'une attaque de 51 %, où une seule entité détient la majorité de la puissance de calcul (Choi et al., 2016). Les risques opérationnels comprennent les fourches, qui peuvent se produire si la communauté des développeurs n'est pas d'accord sur des questions importantes. Il peut en résulter plusieurs versions concurrentes de la base de code, ce qui pourrait compromettre l'intégrité d'un protocole de blockchain (Lindman et al., 2017). Ce dernier est confronté à des risques de sécurité qui trouvent leur origine dans des erreurs de codage, un fait que nous avons reconnu au début de notre processus et que nous avons essayé d'atténuer autant que possible. L'utilisation du code bien audité d'OpenZeppelin comme base de notre implémentation est une mesure efficace pour réduire la surface d'attaque de nos smart contracts [expert #4]. Malgré ces mesures, il n'est pas exclu que l'application soit vulnérable. Des tests de pénétration par des professionnels de la sécurité seraient une contribution précieuse (Vacca, 2013). Les erreurs opérationnelles, telles que le redéploiement de nouvelles versions de contrats intelligents, ouvrent d'autres possibilités d'erreur humaine. Cependant, un scénario dans lequel les utilisateurs sont amenés à interagir avec une version obsolète ou même frauduleuse du contrat intelligent, au lieu d'une version valide, pourrait être imaginé et poser un problème. En outre, la sécurité du compte de l'organisateur de l'événement pourrait être compromise au cas où la clé privée qui le garantit serait obtenue par une partie malveillante [expert #1]. La confiance dans les mesures de sécurité prises par l'organisateur de l'événement est donc essentielle pour la sécurité globale du système. Nous avons essayé de limiter les dommages potentiels d'un tel scénario en restreignant effectivement les options du propriétaire pour modifier les paramètres et interrompre les transactions. La propriété des billets elle-même serait toujours protégée dans un tel cas, grâce à l'utilisation de NFT, qui intègrent des règles pour ne donner aux propriétaires actuels que certaines autorisations (Entrißen et al., 2018). Les NFT contribuent également à assurer l'intégrité, car ils garantissent l'unicité des billets par conception [expert #4]. Le prototype n'offre pas un niveau élevé de confidentialité aux utilisateurs, car la blockchain Ethereum est publique et utilise des identités pseudonymes. Les chercheurs ont montré qu'avec un effort limité, la protection de la vie privée basée uniquement sur la blockchain Ethereum est possible.

Le pseudonymat peut être surmonté (Tschorsch et Scheuermann, 2016). Plusieurs experts interrogés ont fait état de problèmes juridiques potentiels, car les lois sur la confidentialité des données pourraient être enfreintes. Outre l'intégrité et la confidentialité, la disponibilité est un facteur clé d'un système sécurisé (Vacca, 2013). La blockchain Ethereum, qui est le protocole utilisé comme base pour notre prototype, garantit une absence quasi totale de temps d'arrêt (Vermeulen, Fenwick et Kaal, 2018).

DO5 - Validation : La vérification de la propriété des billets a bien fonctionné dans nos simulations. En raison de la transparence de toutes les transactions effectuées avec le contrat intelligent, les utilisateurs sont en mesure de vérifier l'exactitude de leurs actions à tout moment (Beck et al., 2016). Les seuls prérequis sont l'accès à internet et la possession de la crypto-monnaie Ether, car les appels de fonction ne sont pas exempts de coûts de transaction. Si la quantité de gaz fournie est insuffisante et doit être payée avec la crypto-monnaie Ether, les interactions avec le contrat intelligent échoueront (Delmolino et al., 2016). Cependant, comme le montre une proposition récente, il est également possible de mettre en place un réseau de contrats intelligents pour payer les coûts du gaz à la place de l'utilisateur (Weiss, Tirosh et Forshtat, 2018). En outre, le temps de propagation pour l'utilisation du contrôle d'accès sur le lieu de l'événement prend du temps, ce qui pourrait ne pas suffire pour les scénarios où une faible latence est nécessaire (Cai et al., 2018). Comme la lecture de toutes les autorisations de billets directement à partir de la blockchain pourrait ne pas être réalisable, la mise en cache des données juste avant le début d'un événement pourrait être une solution de contournement.

DO6 - Transparence : Les données de la transaction étant stockées de manière immuable sur la blockchain, un enregistrement de la propriété du billet est conservé. La nature ouverte de la blockchain Ethereum permet à quiconque de consulter et donc de vérifier le propriétaire actuel d'un billet à tout moment. Cependant, la consultation de la propriété ne renvoie qu'au compte Ethereum ou au contrat intelligent propriétaire d'un billet. En raison de la nature pseudonyme de la blockchain, aucun détail sur l'identité de l'utilisateur n'est connu, à moins que des efforts ne soient déployés pour découvrir la véritable identité derrière le compte ou pour effectuer un KYC afin d'identifier les utilisateurs au préalable (Cai et al., 2018). Pour parvenir à une transparence totale, le KYC est nécessaire car toute entité peut posséder plusieurs adresses Ethereum [expert #3]. Une plus grande transparence se heurterait à la résistance de nombreux organisateurs d'événements par crainte de découvrir des accords parallèles illégaux, tels que la rétention de contingents spéciaux de billets non visibles pour le public qui sont négociés dans l'ombre pour obtenir des faveurs spéciales [expert #2].

DO7 - Automatisation : Comme notre simulation l'a montré avec succès, l'organisateur de l'événement n'a plus besoin de prendre des mesures manuelles après le déploiement initial du contrat intelligent. Toutefois, en cas d'erreurs commises lors de la phase de configuration, l'organisateur de l'événement ne peut les corriger qu'en envoyant des transactions aux contrats intelligents, ce qui entraîne des frais de transaction. L'organisateur doit donc approvisionner correctement le compte à l'avance.

DO8 - Rentabilité : La simulation du déploiement du prototype a montré que la quantité de gaz attendue nécessaire de 5 millions de gaz coûte environ 0,01 Ether. Le montant correspondant en monnaie fiduciaire telle que l'USD ou l'EUR dépend du taux de change actuel, qui est très volatil (Rimba et al., 2018). Au moment de notre simulation, il correspondait à environ 1 USD (EthGasStation, 2019). Une hausse des prix de l'Ether pourrait augmenter considérablement les coûts et réduire la rentabilité [expert #6]. Pour les participants à l'événement, les frais de transaction pour chaque interaction avec le contrat intelligent sont nettement moins élevés. Toutefois, malgré des coûts inférieurs, le fait que les utilisateurs se voient constamment rappeler que toute interaction avec le prototype s'accompagne de frais minimes pourrait inciter certains utilisateurs à préférer une solution centralisée, où les prix sont plus cachés (Beck et al., 2016).

Discussion sur les avantages et les défis généraux

Outre nos conclusions relatives au cas d'utilisation de la billetterie événementielle, nos recherches documentaires et nos entretiens avec des experts ont révélé d'autres avantages et défis pour les NFT en général. Nous discutons brièvement de ces découvertes ici et présentons des moyens potentiels de surmonter chacun des problèmes que nous avons découverts.

L'un des principaux avantages des NFT est de **représenter l'unicité** mieux que n'importe quel instrument basé sur la blockchain auparavant [expert #3]. Ils peuvent contribuer à rendre les actifs programmables et à améliorer la liquidité et la sécurité. Même pour les actifs présentant certains aspects fongibles, une meilleure différenciation peut être obtenue si les NFT sont utilisés plutôt que des jetons fongibles [expert #3]. Grâce à ces avantages, **les NFT permettent de nouveaux cas d'utilisation** de la technologie blockchain et ont le potentiel d'améliorer les systèmes blockchain existants en les simplifiant [expert #1]. Deux cas d'utilisation principaux peuvent être distingués. Tout d'abord, la **tokenisation des biens numériques** convient parfaitement aux NFT, car ils peuvent garantir l'authenticité et l'unicité [expert n° 4]. Les billets peuvent être considérés comme un ensemble de droits et la tokenisation des droits en général peut donc être considérée comme un cas d'utilisation viable pour les systèmes basés sur la blockchain et plus particulièrement pour les NFT [expert #3, #5]. Au cours de nos recherches dans la littérature grise, nous avons trouvé plusieurs cas d'utilisation qui fournissent des preuves supplémentaires de l'utilité des NFT, comme la mise en place de nouveaux modèles commerciaux pour les licences logicielles et une nouvelle forme de propriété dans l'art numérique (Oxcert, 2018 ; Griffin, 2018). Deuxièmement, les NFT sont parfaitement adaptés pour **représenter des actifs physiques** dans la sphère numérique [expert #4, #7, #9]. L'augmentation de la

la transparence de la propriété profite aux régulateurs [expert n° 6]. Toutefois, pour combler le fossé entre le monde physique et le monde numérique, des composants supplémentaires tels que des capteurs intelligents sont nécessaires [experts n° 7, n° 8].

Cependant, l'utilisation des **NFT pose plusieurs problèmes**. Comme ils ne sont rien d'autre qu'un morceau de code logiciel standardisé exécuté sur une blockchain, ils dépendent fortement des propriétés du protocole de la blockchain sous-jacente. Comme l'a expliqué un expert, *"tout ce que vous pouvez faire avec les NFT est rendu possible par Ethereum, et tout ce que vous ne pouvez pas faire n'est pas rendu possible par Ethereum"* [expert #1]. L'un des défis les plus notables d'Ethereum est son **évolutivité limitée** (Eberhardt et Tai, 2018). Cependant, nous avons constaté que des solutions permettant de surmonter ce défi existent déjà, comme l'utilisation de canaux d'état (Coleman et al., 2018). Si ce problème est résolu, les NFT devraient être extrêmement évolutifs, car les tests ont révélé qu'un seul contrat peut gérer ²¹²⁸ NFT sans problème (Entriiken et al., 2018). Un autre défi est le dilemme de conception de la **vie privée** par rapport à la blockchain sans permission (Corten, 2017). De nombreux chercheurs ont montré que la protection de la vie privée n'est pas garantie, car il est possible de donner un sens à des données pseudonymes sur des blockchains publiques, où la transparence et l'accès public sont des caractéristiques essentielles (Tschorsch et Scheuermann, 2016). Cependant, le développement de nouvelles technologies prometteuses telles que les preuves à connaissance nulle (ZKP) est en cours et résoudra ce problème à l'avenir (Koens, Ramaekers et Van Wijk, 2018). ZKP est une méthode cryptographique permettant de prouver à une autre partie certaines propriétés sans les révéler (par exemple, prouver que vous avez un certain âge, sans révéler votre âge réel) (Koens et al., 2018). Une première preuve que la protection de la vie privée est possible pour les NFT a été apportée par une équipe spécialisée de la société EY, qui a utilisé des ZKP en combinaison avec des NFT pour faciliter les transactions de capital-investissement (Khatri, 2018). En outre, les NFT **ne sont pas facilement accessibles aux utilisateurs de détail**, car ils constituent un élément de backend et n'offrent pas d'interface conviviale [expert #1]. L'obligation de payer du gaz pour chaque appel de fonction, dont le prix est fixé en Ether, complique l'utilisation des systèmes basés sur la blockchain, même pour les utilisateurs expérimentés (Rimba et al., 2018). Ainsi, les utilisateurs sont tenus d'acheter des crypto-monnaies à l'avance pour payer les frais de transaction, même dans le cas où le modèle commercial ne facturerait généralement pas les utilisateurs au détail (Cai et al., 2018). Cependant, une récente EIP (Ethereum Improvement Proposal) appelée "Gas Stations Network", permettant aux contrats intelligents de payer les coûts du gaz à la place de l'utilisateur, montre que ce problème peut être résolu (Weiss et al., 2018). Non seulement le prix du gaz fluctue, mais le prix de la crypto-monnaie Ether est également très volatil (Rimba et al., 2018). Il est donc très difficile pour les utilisateurs au détail de calculer les coûts sur la base de monnaies fiduciaires telles que l'USD. Un moyen potentiel de surmonter ce défi consiste à utiliser des stablecoins décentralisés tels que Dai, qui tentent de ressembler à la valeur de la monnaie fiduciaire et libèrent ainsi les utilisateurs du risque de change et de l'effort mental lié à la fluctuation des taux de change (Ito et O'Dair, 2019). Un autre défi important pour l'utilisation des systèmes basés sur la blockchain en général est l'**applicabilité juridique limitée** (Christidis et Devetsikiotis, 2016). Si le propriétaire d'un jeton peut se fier à l'authenticité, la propriété légale et la consommation des droits représentés par les NFT sont une autre affaire [expert #3, #7]. Pour qu'un système basé sur la blockchain soit vraiment sans confiance, il faut qu'il soit juridiquement correct et légitime dans l'environnement institutionnel actuel (Hawlitschek, Notheisen et Teubner, 2018). En outre, les NFT étant un phénomène très jeune, les personnes qui les comprennent sont très rares et le langage utilisé dans l'espace blockchain est très technique et généralement mal compris par le public [expert #1, #5, #9].

Au cours de la construction de l'artefact, nous avons découvert un problème typique des NFT concernant la **création de jetons**. Contrairement aux jetons fongibles, il n'est pas possible de créer immédiatement de nombreux jetons pour les NFT. Frapper les NFT un par un est lourd et inefficace, car cela nécessite beaucoup de puissance de calcul, d'où des coûts de gaz élevés. Une solution que nous avons trouvée et appliquée consiste à créer les jetons uniquement lorsqu'ils sont demandés et payés par les acheteurs. Cette stratégie est appelée "user-mintable" (Stehlik et Vogelsang, 2018). Un autre défi est le processus en deux étapes d'**approbation des transactions** avant que la transaction réelle puisse avoir lieu (Entriiken et al., 2018). Bien qu'une solution couramment utilisée consiste à transférer temporairement les NFT vers un contrat de place de marché qui prend en charge les transactions, cette approche présente certains inconvénients. Le fait que la propriété du jeton soit temporairement transférée hors du propriétaire pose un problème pour certains cas d'utilisation et la sécurité peut être affectée négativement. De plus, chaque transfert supplémentaire coûte du gaz et réduit l'efficacité. En outre, la nature des contrats intelligents permet généralement d'étendre facilement le système avec de nouvelles fonctionnalités. Cependant, la **mise à niveau des contrats intelligents existants** comporte de nombreux risques techniques et opérationnels et coûte de l'argent. S'appuyer sur des cadres de développement comme OpenZeppelin et Truffle simplifie considérablement les procédures de mise à niveau et réduit les risques.

En résumé, les NFT offrent de nouveaux moyens avantageux de représenter numériquement les actifs numériques et physiques. Cependant, de nombreux défis restent à relever. Les NFT reposent sur la technologie blockchain, qui en est encore à ses débuts et n'est pas encore prête pour un marché de masse d'utilisateurs de détail, qui exigent simplicité, interfaces conviviales et clarté juridique. Ces exigences ne peuvent pas être résolues par les NFT, mais doivent être abordées au niveau de la technologie blockchain sous-jacente.

les protocoles de blockchain et les institutions juridiques. En outre, les connaissances du public sur les NFT sont encore rares. Pour ces raisons, nous nous attendons à ce que son rôle soit limité à un composant de backend plutôt que d'être directement visible pour les utilisateurs au détail. Néanmoins, nous considérons les NFT comme un composant très précieux pour les systèmes basés sur la blockchain, avec le potentiel de permettre de nombreux autres cas d'utilisation pratiques en dehors de celui discuté dans ce document.

Conclusion

Nous avons étudié les NFT en tant que phénomène émergent et évalué les NFT en tant qu'élément de base d'un système de billetterie événementielle basé sur la blockchain. Nous avons suivi une approche de science de la conception basée sur les lignes directrices de Hevner et al. (2004) et développé un prototype de manière itérative. Grâce au processus de conception, de construction et d'évaluation du prototype basé sur les NFT, nous avons été en mesure de générer plusieurs résultats pertinents concernant les avantages et les défis du nouveau type de jeton. Nous avons constaté que les NFT peuvent aider à surmonter les faiblesses actuelles des systèmes de billetterie d'événements sans blockchain, comme la vulnérabilité à la fraude, le manque de contrôle sur les transactions du marché secondaire et la validation de la propriété. En outre, nos conclusions indiquent que l'utilisation des NFT pose actuellement plusieurs défis, principalement hérités du protocole blockchain sous-jacent. Comme nous avons montré que des travaux sur des solutions pour surmonter ces défis sont actuellement en cours, nous proposons d'autres recherches pour réévaluer l'état de ces défis dans un avenir proche.

Avant de souligner les contributions de notre recherche, nous devons en examiner les limites. Tout d'abord, en examinant en détail un cas d'utilisation spécifique et en suivant un processus de recherche rigoureux pour en tirer des implications généralisables, il se peut que nous ayons manqué certaines idées qui auraient pu être découvertes dans d'autres cas d'utilisation. Le cas d'utilisation lui-même se limite à un modèle fortement simplifié des exigences relatives à un système de billetterie pour un événement et ne tient pas compte en détail du rôle des autres parties prenantes et des processus connexes. Nos choix architecturaux peuvent encore réduire la généralisation (Koenigs et Poll, 2018). Deuxièmement, malgré notre tentative d'aborder les questions de l'expérience utilisateur, des implications juridiques ainsi que des risques techniques et opérationnels, nous reconnaissons son rôle limité dans cette étude (Governatori et al., 2018). Pour mieux comprendre l'acceptation par les utilisateurs d'un système basé sur les NFT, nous suggérons donc des études complémentaires sur d'autres cas d'utilisation des NFT, y compris des expériences de terrain approfondies avec des utilisateurs du commerce de détail et des experts juridiques en tant qu'éléments clés. Par conséquent, nos résultats devraient simplement être perçus comme une étape préliminaire vers une meilleure compréhension théorique et pratique des NFT.

Malgré ces limites, notre recherche est l'une des premières tentatives scientifiques visant à répondre aux questions de savoir si les NFT sont utiles dans la pratique et comment ils peuvent contribuer à améliorer les systèmes existants dans les domaines du monde réel. Les informations précieuses que nous générons pour les praticiens sont de trois ordres : Premièrement, nous soulignons les différences entre les NFT et les jetons fongibles et fournissons les meilleures pratiques pour le développement et l'évaluation des systèmes utilisant les NFT. Deuxièmement, nous démontrons l'utilité des NFT pour le cas d'utilisation des billets d'événement et fournissons une preuve par construction grâce à la mise en œuvre réussie d'un prototype fonctionnel (Hevner et al., 2004). Troisièmement, nous développons les conséquences de son utilisation et mettons en évidence les défis pratiques. En plus de ces idées pratiques, nous ajoutons des connaissances descriptives à un domaine de recherche émergent où les études scientifiques sont rares. Nous étendons et complétons les études existantes dans la littérature sur la technologie blockchain en ajoutant de nouvelles approches de meilleures pratiques sur la façon de construire et d'évaluer un système basé sur la blockchain en utilisant le DSR (Glaser, 2017). Enfin, notre recherche sert de base à de futures recherches théoriques et pratiques sur les NFT, permet à d'autres chercheurs de s'inspirer de ses résultats et de ses principes de conception et jette les bases d'un développement théorique plus poussé (Gregor, 2006).

Références

- 0xcert (2018). "NFT Spotlight #3 - KnownOrigin, la plateforme d'art non fongible". Récupéré de <https://0xcert.org/news/nft-spotlight-3-knownorigin/>
- Akoka, J., I. Comyn-Wattiau, N. Prat et V. C. Storey. (2017). "Évaluer les types de connaissances dans la recherche en sciences de la conception : An integrated framework." *Lecture Notes in Computer Science*.
- Atzei, N., M. Bartoletti et T. Cimoli. (2017). "Une enquête sur les attaques contre les contrats intelligents Ethereum (SoK)". In : M. Maffei & M. Ryan (Eds.), *Principles of Security and Trust* (pp. 164-186). Springer.
- AutonomousNEXT. (2018). "Crypto Utopia". Consulté sur <https://t.co/QsFhfc8MSI>
- aventus. (2018). *A Blockchain-Based d'événements billetterie Event Ticketing Protocol*. Récupéré sur le site <https://aventus.io/doc/whitepaper.pdf>

- Avital, M., J. L. King, R. Beck, M. Rossi et R. Teigland. (2016). "Jumping on the Blockchain Bandwagon : Leçons du passé et perspectives d'avenir". In : *ICIS 2016 Proceedings* (pp. 1-6).
- Beck, R. et C. Müller-Bloch. (2017). "Blockchain as Radical Innovation : A Framework for Engaging with Distributed Ledgers as Incumbent Organization." In : *Actes de la 50e Conférence internationale d'Hawaï sur les sciences des systèmes (2017)* (pp. 5390-5399).
- Beck, R., J. Stenum Czepluch, N. Lollike et S. Malone. (2016). "Blockchain - The Gateway to Trust-Free Cryptographic Transactions". In : *Vingt-quatrième conférence européenne sur les systèmes d'information (ECIS), Istanbul, Turquie, 2016*. (pp. 1-14). Springer Publishing Company.
- Butcher, M. (2018). "Quelle est la prochaine étape ? Oh oui, transformer une voiture de luxe en un jeton non fongible". Récupéré de <https://tcn.ch/2uPJuf>
- Buterin, V. (2014). "Un contrat intelligent de nouvelle génération et une plateforme d'application décentralisée". Récupéré à partir de <http://buyxpr.com/build/pdfs/EthereumWhitePaper.pdf>
- Cai, W., Z. Wang, J. B. Ernst, Z. Hong, C. Feng et V. C. M. Leung. (2018). "Applications décentralisées : Le système logiciel alimenté par la blockchain". *IEEE Access*, 6, 53019-53033.
- Choi, S., K. Smolander, S. Park, J. Yli-Huumo et D. Ko. (2016). "Où en est la recherche actuelle sur la blockchain ? Une revue systématique". *PLOS ONE*, 11(10), 1-27.
- Christidis, K. et M. Devetsikiotis. (2016). "Blockchains et contrats intelligents pour l'internet des objets". *IEEE Access*, 4, 2292-2303.
- Coleman, J., L. Horne et L. L. Xuanji. (2018). *Contrefactuel : canaux d'état généralisés*. Récupéré à partir de <https://l4.ventures/papers/statechannels.pdf>
- Consensys. (2019). "Infura - Infrastructure blockchain évolutive". Consulté sur <https://infura.io/>
- Corten, P. A. (2017). *La technologie blockchain pour les services gouvernementaux : Dilemmes dans l'application des principes de conception*.
- Courty, P. (2017). *La revente de billets, les bots et la malédiction de la billetterie à prix équitable*. Extrait de <http://web.uvic.ca/~pcourty/FPT1005.pdf>
- Davidson, S., M. Novak et J. Potts. (2018). *Le coût de la confiance : Une étude pilote*. Consulté sur le site <https://ssrn.com/abstract=3218761>
- Delmolino, K., M. Arnett, A. E. Kosba, A. Miller et E. Shi. (2016). "Étape par étape vers la création d'un contrat intelligent sûr : leçons et perspectives d'un laboratoire de crypto-monnaies". In : J. Clark, S. Meiklejohn, P. Y. A. Ryan, D. S. Wallach, M. Brenner, & K. Rohloff (Eds.), *Financial Cryptography and Data Security, Christ Church, Barbados, February 26, 2016* (Vol. 9604, pp. 79-94). Springer.
- Eberhardt, J. et S. Tai. (2018). *ZoKrates-Scalable Privacy-Preserving Off-Chain Computations (Calculs hors chaîne préservant la vie privée)*. Extrait de <https://github.com/JacobEberhardt/ZoKrates>
- Entriiken, W., D. Shirley, J. Evans et N. Sachs. (2018). "Norme de jeton non fongible ERC-721". Extrait de <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>
- Ethereum Foundation. (2018). "Ethereum Amélioration Proposals". Récupéré sur <https://eips.ethereum.org/>
- Etherscan. (2018). "Token Tracker". Récupéré de <https://etherscan.io/tokens>
- EthGasStation. (2019). "ETH Gas Station". Consulté sur <https://ethgasstation.info/calculatorTxV.php>
- Fenech, G. (2018). "Débloquer un marché des objets de collection de 200 milliards de dollars sur la blockchain". Récupéré de <https://www.forbes.com/sites/geraldfenech/2018/11/08/unlocking-a-200-billion-dollar-collectibles-market-on-the-blockchain/#4e2a60cf5554>
- Fridgen, G., F. Regner, A. Schweizer et N. Urbach. (2018). "Ne pas glisser sur l'Initial Coin Offering (ICO) - Une taxonomie pour une forme de crowdfunding basée sur la blockchain". In : *ECIS 2018*.
- Fröwis, M. et R. Böhme. (2017). "In Code We Trust ?" In : J. Garcia-Alfaro, G. Navarro-Arribas, H. Hartenstein, & J. Herrera-Joancomartí (Eds.), *Data Privacy Management, Cryptocurrencies and Blockchain Technology* (pp. 357-372). Cham : Springer International Publishing.
- Fujimura, K., H. Kuno, M. Terada, K. Matsuyama, Y. Mizuno et J. Sekine. (1999). "Digital-ticket- controlled Digital Ticket Circulation". In : *Proceedings of the 8th Conference on USENIX Security Symposium - Volume 8* (p. 18). Berkeley, CA, USA : USENIX Association.
- GET. (2017). *Jeton d'entrée garantie - Protocole de billetterie événementielle intelligente*. Consulté sur <https://get-protocol.io/files/GET-Whitepaper-GUTS-Tickets-latest.pdf>
- Glaser, F. (2017). "Décentralisation omniprésente des infrastructures numériques : A Framework for Blockchain enabled System and Use Case Analysis." In : *50th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-50), Waikoloa Village, Hawaii, January 4 - 7, 2017* (pp. 1543-1552).
- Governatori, G., F. Idelberger, Z. Milosevic, R. Riveret, G. Sartor et X. Xu. (2018). "Sur les contrats légaux, les contrats intelligents impératifs et déclaratifs, et les systèmes de blockchain". *AI and Law*, 26(4), 377-409.

- Gregor, S. (2006). "The Nature of Theory in Information Systems" (La nature de la théorie dans les systèmes d'information). *MIS Quarterly*, 30(3), 611-642.
- Gregor, S. et A. R. Hevner. (2013). "Positionnement et présentation de la recherche en sciences de la conception pour un impact maximal". *MIS Quarterly*, 37(2), 337-355.
- Griffin, J. (2018). "Software licences as non-fungible tokens" (Les licences logicielles en tant que jetons non fongibles). Récupérée de <https://medium.com/collabs-io/software-licences-as-non-fungible-tokens-1f0635913e41>.
- Hawblitschek, F., B. Notheisen et T. Teubner. (2018). "Les limites des systèmes sans confiance : Une revue de la littérature sur la technologie blockchain et la confiance dans l'économie du partage." *Recherches et applications sur le commerce électronique*, 29, 50-63.
- Hevner, A. R. (2007). "A three cycle view of design science research". *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2), 87-92.
- Hevner, A. R., S. T. March, J. Park et S. Ram. (2004). "La science de la conception dans la recherche sur les systèmes d'information". *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105.
- Holstein, J. A. et J. F. Gubrium. (1995). *The Active Interview*. SAGE Publications.
- Ito, K. et M. O'Dair. (2019). "Un examen critique de l'application de la technologie Blockchain à la gestion de la propriété intellectuelle". In : H. Treiblmaier & R. Beck (Eds.), *Business Transformation through Blockchain : Volume II* (pp. 317-335). Cham : Springer International Publishing.
- Janzen, D. et H. Saiedian. (2005). "Test-driven development concepts, taxonomy, and future direction". *Computer*, 38(9), 43-50.
- Khatri, Y. (2018). "EY révèle une solution de confidentialité à preuve de connaissance zéro pour Ethereum". Récupéré de <https://www.coindesk.com/ey-reveals-zero-knowledge-proof-privacy-solution-for-ethereum/>
- Koens, T. et E. Poll. (2018). "De quelle alternative blockchain avez-vous besoin ? BT - Gestion de la confidentialité des données, cryptocurrencies et technologie blockchain." In : J. Garcia-Alfaro, J. Herrera-Joancomartí, G. Livraga, & R. Rios (Eds.), (pp. 113-129). Cham : Springer International Publishing.
- Koens, T., C. Ramaekers et C. Van Wijk. (2018). *Preuves efficaces de portée à zéro connaissance dans Ethereum*. Extrait de <https://t.co/RDwESNOvjR?amp=1>
- Leonhart, M. (2018). "Environ 12 % des personnes qui achètent des billets de concert se font arnaquer". Consulté sur le site <https://www.cnn.com/2018/09/13/about-12-percent-of-people-buying-concert-tickets-get-scammed-.html>
- Lindman, J., V. K. Tuunainen et M. Rossi. (2017). "Opportunités et risques des technologies de la blockchain - un programme de recherche". In : *Actes de la 50e Conférence internationale d'Hawaï sur les sciences des systèmes* (p. 1533-1542). Waikoloa, États-Unis.
- March, S. T. et G. F. Smith. (1995). "Design and natural science research on information technology". *Decision Support Systems*, 15(4), 251-266.
- McMillan, C. (2016). "La billetterie secondaire : le problème et les solutions possibles, expliqués". Récupéré de <https://inews.co.uk/culture/music/secondary-ticketing-problems-solutions/>
- Merriam-Webster. (2018). "Fongible Synonymes, Fongible Antonyms". Récupéré de <https://www.merriam-webster.com/thesaurus/fungible>
- Morabito, V. (2017). *L'innovation commerciale à travers la blockchain*. Springer International Publishing.
- Mougayar, W. (2018). "La Blockchain's magique Million d'utilisateurs Club". Récupéré de <http://startupmanagement.org/2018/11/20/the-blockchains-magical-million-users-club/>
- Muzzy, E. (2018). "CryptoKitties Isn't à propos de les Cats". Récupéré de <https://medium.com/@everett.muzzy/cryptokitties-isnt-about-the-cats-aef47bcde92d>
- Nærlund, K., C. Müller-bloch, R. Beck et S. Palmund. (2017). "Blockchain to Rule the Waves - Nascent Design Principles for Reducing Risk and Uncertainty in Decentralized Environments Abstract." In : *Trente-huitième conférence internationale sur les systèmes d'information, Corée du Sud 2017*.
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Extrait de <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Notheisen, B., J. B. Cholewa et A. P. Shanmugam. (2017). "Trading Real-World Assets on Blockchain" (Échange d'actifs du monde réel sur la blockchain). *Business & Information Systems Engineering*, 59(6), 425-440.
- Nunamaker, J. F., M. Chen et T. D. M. Purdin. (1990). "Développement de systèmes dans les systèmes d'information recherche". *Journal of Management Information Systems*, 6(4), 89-106.
- NZ Herald. (2017). "The great ticket mark-up - how fans are paying through the nose" (La grande majoration des billets - comment les fans paient au prix fort). Récupéré de https://www.nzherald.co.nz/entertainment/news/article.cfm?c_id=1501119&objectid=11833817
- OpenSea. (2019). "OpenSea. Tiré de <https://opensea.io/>
- OpenZeppelin. (2019). "OpenZeppelin". Consulté sur <https://openzeppelin.org/>

- Parra Moyano, J. et O. Ross. (2017). "Optimisation du KYC à l'aide de la technologie du grand livre distribué". *Business and Information Systems Engineering*, 59(6), 411-423.
- Pichler, D. (2018). *Tokenization : The Shifting Future of Digital Assets*. Récupéré sur https://riat.ac.at/pichlerd_tokenization.pdf
- Pries-Heje, J., R. L. Baskerville et J. R. Venable. (2008). "Stratégies d'évaluation de la recherche en sciences de la conception". *Conférence européenne sur les systèmes d'information (ECIS 2008)*, document 87.
- Protofire. (2019). "Solhint - Solidity Linter". Récupéré de <https://protofire.github.io/solhint/>
- Rimba, P., A. B. Tran, I. Weber, M. Staples, A. Ponomarev et X. Xu. (2018). "Quantifier le coût de la méfiance : Comparing Blockchain and Cloud Services for Business Process Execution." *Frontières des systèmes d'information*, 1-19.
- Rohr, J. et A. Wright. (2017). *Blockchain-Based Token Sales, Initial Coin Offerings, and the Democratization of Public Capital Markets* (Cardozo Legal Studies Research Paper No. 527). *SSRN*.
- Schultze, U. et M. Avital. (2011). "Concevoir des entretiens pour générer des données riches pour les systèmes d'information Research". *Information and Organization*, 21(1), 1-16.
- Schweizer, A., V. Schlatt, N. Urbach et G. Fridgen. (2017). "Unchaining Social Businesses - Blockchain comme technologie de base d'une plateforme de crowdlending". In : *38e ICIS*.
- Sillaber, C. et B. Waltl (2017). "Cycle de vie des contrats intelligents dans les écosystèmes de blockchain". *Datenschutz Und Datensicherheit - DuD*, 41(8), 497-500.
- Sparango, B. (2018). "La montée des non fongibles Token Assets". Récupéré de <https://medium.com/coinmonks/the-rise-of-non-fungible-token-assets-7fdb4bbb8ad7>
- Stehlik, P. et L. Vogelsang (2018). *Privacy-Enabled NFTs : User-Mintable, Non-Fungible Tokens With Private Off-Chain Data (jetons modifiables par l'utilisateur et non fongibles avec des données privées hors chaîne)*. Extrait de <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>
- Szabo, N. (1994). "Smart Contracts". Extrait de <https://bit.ly/2rLG2Nr>
- Tackmann, B. (2017). "Des billets d'événements sécurisés sur une blockchain". In : *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 10436 LNCS, pp. 437-444). Springer, Cham.
- Tepper, F. (2017). "Des personnes ont dépensé plus d'un million de dollars pour acheter des chats virtuels sur la blockchain Ethereum". Récupéré à partir de <https://t.co/Ea718is6M5>
- Le gouvernement australien, le Trésor. (2017). *Ticket Reselling in Australia (Revente de billets en Australie)*. Extrait de www.itsanhonour.gov.au
- Tikhomirov, S. (2018). "Ethereum : État des connaissances et perspectives de recherche". In : A. Imine, J. M. Fernandez, J.-Y. Marion, L. Logrippo, & J. Garcia-Alfaro (Eds.), *Foundations and Practice of Security* (pp. 206-221). Cham : Springer International Publishing.
- Tomaino, N. (2018). "Digital Collectibles : L'émergence d'une nouvelle catégorie de jetons". Récupéré de <https://thecontrol.co/digital-collectibles-a-new-category-of-tokens-emerging-fb991c1dff6a>
- La truffe. (2019). "Truffle Suite. Consulté sur <https://truffleframework.com/>
- Tschorsch, F. et B. Scheuermann. (2016). "Bitcoin et au-delà : A technical survey on decentralized digital currencies". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(3), 2084-2123.
- Vacca, J. R. (2013). *Manuel de sécurité informatique et de l'information*. (J. R. Vacca, Ed.) (2nd ed). Waltham, Mass : Morgan Kaufmann.
- Vermeulen, E., M. Fenwick et W. Kaal (2018). "Pourquoi la blockchain va perturber les organisations d'entreprise : What can be Learned from the "Digital Transformation"." *The Journal of the British Blockchain Association*, 1(2), 91-100.
- Vogelsteller, F. (2015). "ERC : Token standard #20." Récupéré de <https://github.com/ethereum/EIPs/issues/20>
- Voshmgir, S. (2018). "Fungible Tokens vs. Non-Fungible Tokens". Récupéré de <https://blockchainhub.net/blog/blog/nfts-fungible-tokens-vs-non-fungible-tokens/>
- Waltl, B., C. Sillaber, U. Gallersdörfer et F. Matthes (2019). "Blockchains et contrats intelligents : Une menace pour l'industrie juridique ?" In : *Business Transformation through Blockchain : Volume II* (pp. 287-315).
- Wang, Y. (2017). *Conception de systèmes d'information comptable basés sur la blockchain préservant la vie privée*. *Journal électronique SSRN*.
- Waterson, M. (2016). *Examen indépendant des mesures de protection des consommateurs concernant les billetteries secondaires en ligne*. Extrait de <https://bit.ly/2wLvnrB>
- Weiss, Y., D. Tirosh et A. Forshtat. (2018). "EIP 1613 : Réseau de stations-service". Récupéré de <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1613>
- Wood, G. (2014). "Ethereum : a secure decentralised generalised transaction ledger". *Livre jaune du projet Ethereum*, 1-32.
- Wüst, K. et A. Gervais. (2017). "Avez-vous besoin d'une blockchain ?" *IACR Cryptology EPrint Archive*, 1-7.
- Zohar, A. (2015). "Bitcoin : Under the Hood". *Communications of the ACM*, 58(9), 104-113.