



Adoption de la technologie Blockchain pour les réseaux sans fil modernes

Moez Krichen

► To cite this version:

Moez Krichen. Adoption de la technologie Blockchain pour les réseaux sans fil modernes. 2022. <hal-04058671>

HAL Id: hal-04058671

<https://hal.science/hal-04058671v1>

Preprint submitted on 5 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Adoption de la technologie Blockchain pour les réseaux sans fil modernes

Moez Krichen

Laboratoire ReDCAD, Université de Sfax, Tunisie
moez.krichen@redcad.org

Résumé. La blockchain est une technologie de pointe qui a changé la façon dont les gens communiquent et commercent. Il s'agit d'une chaîne de blocs dans un réseau peer-to-peer (P2P) distribué et décentralisé qui stocke des informations avec des signatures numériques. Cette méthode a d'abord été utilisée pour développer des monnaies numériques telles que Bitcoin et Ethereum. Cependant, certaines recherches et études industrielles récentes se sont concentrées sur les perspectives que la blockchain présente dans une variété d'autres domaines d'application afin de tirer parti des qualités fondamentales de la technologie, telles que la décentralisation, la persistance, l'anonymat et l'audibilité. Dans cette étude, nous donnons une évaluation approfondie de l'utilisation de la blockchain pour les réseaux sans fil. Nous présentons également les principaux obstacles de la Blockchain afin de permettre aux chercheurs de les résoudre et d'améliorer l'utilisation de la technologie.

1 Introduction

La blockchain (21) est un paradigme révolutionnaire qui a introduit de nouvelles notions pour le partage sécurisé des données et des informations. Cette technologie actuelle comprend une chaîne de blocs qui permet le stockage sécurisé de toutes les transactions engagées sur des réseaux partagés (39). Les hachages cryptographiques, les techniques de consensus distribué et les signatures numériques font partie des technologies de base utilisées pour atteindre cet objectif. Toutes les transactions sont décentralisées, éliminant ainsi le besoin d'intermédiaires pour les authentifier ou les vérifier. La décentralisation, la persistance, l'anonymat et l'auditabilité sont quelques-unes des principales caractéristiques de la blockchain (18).

La blockchain a été initialement proposée pour prendre en charge la crypto-monnaie bien connue Bitcoin (40). Cependant, au cours des dernières années, la blockchain a été adoptée dans plusieurs nouveaux domaines bien au-delà des crypto-monnaies (33; 1; 38), notamment la santé (46; 45), le transport intelligent (16; 4) et l'IoT. (11). En effet, grâce à sa capacité à accroître l'équité et la transparence et à aider les organisations à économiser de l'argent et du temps, cette technologie influence un large éventail d'industries (3; 47) allant des activités de divertissement individuelles de base à la gestion des affaires critiques et sensibles de gouvernements et d'États entiers.

Nos principales contributions à ce travail se concentrent sur les activités de recherche récentes liées à l'inclusion de la technologie blockchain dans les applications modernes en mettant l'accent sur les défis, avantages, limites et défis correspondants. En particulier, nous passons en revue l'architecture de la blockchain dans la Section 2 puis nous présentons une brève revue sur l'utilisation de la blockchain dans les réseaux sans fil (Section 3). La section 4 recense les principaux défis ouverts liés à l'utilisation de la technologie Blockchain. La section 5 est une conclusion générale de l'article.

2 Architecture Blockchain

Une blockchain est une collection en expansion continue de blocs de données liés entre eux pour former une longue chaîne (41) comme décrit dans la figure ?? . Ce réseau de blocs de données connectés représente un registre distribué qui est diffusé sur un réseau peer-to-peer (26). Un registre distribué peut être considéré comme une collection de données numériques synchronisées, répliquées, distribuées et partagées via un réseau peer-to-peer. Chaque appareil lié au réseau maintient la dernière version du grand livre commun, c'est-à-dire que chaque pair du réseau a une copie du grand livre qui est identique à l'autre.

Le grand livre se caractérise principalement par sa sécurité et la base de données ne peut être étendue qu'en ajoutant de nouveaux blocs à la chaîne. Les modifications apportées aux enregistrements déjà enregistrés dans la chaîne sont impossibles en termes de calcul. Par conséquent, l'un des principaux avantages du grand livre distribué décrit est sa nature décentralisée. En effet, il n'y a pas d'autorité centrale qui contrôle le grand livre. Cependant, chaque nœud met à jour son registre lorsqu'un nouveau bloc est ajouté à la blockchain, en utilisant un mécanisme de consensus conjoint (17).

De plus, dans la blockchain, la sécurité des données est renforcée par leur cryptage à l'aide d'algorithmes asymétriques (28). Dans ce type de cryptage, l'émetteur et le récepteur ont une paire de clés composée d'une clé publique et d'une clé privée (44). La clé privée est exclusivement accessible aux nœuds qui l'ont créée, tandis que la clé publique est librement diffusée sur tout le réseau. L'expéditeur crypte les données à l'aide de la clé publique du destinataire. Étant donné que les données sont chiffrées à l'aide de la clé publique du destinataire, elles ne peuvent être déchiffrées qu'à l'aide de la clé privée du destinataire.

De plus, dans le cas de l'envoi de transactions sur un réseau blockchain, une transaction n'est réputée terminée qu'après avoir été signée numériquement. La transaction est signée par l'expéditeur à l'aide de sa clé privée. Pour le destinataire, l'authenticité de la transaction, c'est-à-dire l'identité de l'expéditeur, peut être vérifiée à l'aide de la clé publique associée (appartenant à l'expéditeur). Toutes les transactions sont automatiquement vérifiées et authentifiées par les nœuds, et le réseau rejette toute transaction non authentifiée. Veuillez noter que sur un réseau blockchain, une transaction originale minée est irréversible (34).

Il est difficile d'altérer les données contenues dans les blocs grâce aux qualités cryptographiques de la Blockchain. Pratiquement, les blocs sont connectés via une référence de hachage puisque chaque bloc suivant porte la valeur de hachage du bloc précédent en plus de la valeur de hachage du bloc réel. La génération d'une valeur de hachage

est réalisable à l'aide d'un algorithme de hachage cryptographique mathématique et sophistiqué, qui accepte tout type d'entrée et génère un nombre de longueur fixe appelé valeur de hachage. La principale caractéristique d'une fonction de hachage est que si une seule fraction de l'entrée est modifiée, la valeur entière de la sortie sera modifiée (47).

Par conséquent, si un attaquant tente d'éditer des données dans le bloc 1 (B1), par exemple, la valeur de hachage de ce bloc (B1) sera modifiée dans le bloc suivant (B2), et donc l'intrus devra modifier la valeur de hachage de ce bloc. De plus, comme B2 porte le hachage de B1, toute modification du hachage modifiera la valeur de hachage de B2 dans B3. Par conséquent, si quelqu'un veut modifier un bloc, il doit modifier les données de tous les blocs suivants sur la Blockchain. De plus, même si la valeur de hachage d'un bloc est connue, le calcul de l'entrée de la fonction de hachage est difficile en raison de la fonctionnalité non inversible de la fonction de hachage (44).

La question suivante est de savoir comment ajouter de nouveaux blocs au réseau. En effet, des nœuds appelés "Miners" sont chargés de construire de nouveaux blocs dans la blockchain (34). Le travail des mineurs consiste à mettre à jour les enregistrements du grand livre public de la blockchain à partir des transactions précédentes. Tout nœud de réseau peut être un mineur. Il faut des heures aux mineurs pour créer un nouveau bloc car ils doivent résoudre une énigme mathématique appelée "Proof of Work" (PoW). Plusieurs mineurs peuvent travailler en parallèle pour ajouter un nouveau bloc. Néanmoins, un seul mineur peut ajouter un nouveau bloc à la fois. Le premier mineur à résoudre le problème PoW peut exploiter ce nouveau bloc. Pour résoudre le problème du PoW minier, une énorme puissance de calcul est nécessaire. Nous pouvons décomposer l'ensemble du processus en plusieurs étapes :

- Pour commencer à miner un nouveau bloc, un mineur rassemble les transactions du réseau partagé et les organise dans un bloc.
- Le mineur vérifiera la valeur de hachage précédente de la Blockchain et la déposera avec les transactions dans le nouveau bloc prévu.
- Le mineur va récupérer et enregistrer dans le même bloc une variable appelée "nonce". Cette valeur variable peut être modifiée à tout moment par le mineur.
- Le mineur va maintenant enquêter sur le puzzle PoW du réseau. Le problème consiste à trouver, pour tout le nouveau bloc, une valeur de hachage spéciale commençant par plusieurs zéros (par exemple, 0000000000XXXXX). Cette valeur de hachage spéciale peut être trouvée en modifiant la valeur nonce, qui est le seul paramètre que le mineur peut modifier. Une fois que le mineur découvre le même nombre de zéros de début pour une valeur nonce donnée, il peut diffuser la réponse sur le réseau et démontrer le succès de l'extraction d'un nouveau bloc. Notez que le nombre de zéros successifs indique le niveau de difficulté de minage.

Les nœuds de type mineurs sont également chargés de vérifier toutes les données contenues dans un bloc. À cette fin, les données d'un bloc sont enregistrées sous la forme d'un arbre Merkle, qui représente une structure de données particulière sous la forme d'un arbre basé sur le hachage. Les arbres simplifient la vérification des données. Pensez à ne pas utiliser la structure de l'arbre de Merkle et au lieu d'utiliser la fonction de hachage de toutes les transactions. Si une seule transaction est modifiée, le résultat de

hachage entier sera modifié, ce qui rendra impossible la détection des données modifiées. Mais en utilisant la structure particulière de l'arbre de Merkle, nous pouvons voir à n'importe quelle fraction de l'arbre quelle partie fournit la valeur de hachage erronée. Supposons qu'un attaquant modifie la transaction Tx3. En conséquence, nous pouvons facilement détecter que seul le côté droit de l'arbre Merkle donne des sorties de hachage incorrectes. Étant donné que les valeurs de hachage de Tx3 et Tx4 seront erronées, nous n'avons pas besoin de vérifier Tx1 et Tx2. Par conséquent, l'arbre de Merkle est extrêmement utile pour la vérification des données dans les systèmes distribués peer-to-peer (36).

3 Blockchain pour les réseaux sans fil

Les applications sans fil telles que les connexions Internet à large bande, les smartphones mobiles et l'Internet des véhicules (14; 15) nécessitent toutes un spectre radio-électrique (27). Les réseaux sans fil, comme le cellulaire et le Wi-Fi, sont le moyen le plus rentable de fournir un accès Internet haut débit. Par conséquent, divers régimes de gestion du spectre sont nécessaires pour optimiser les avantages de l'utilisation du spectre disponible en imposant une utilisation efficace du spectre tout en minimisant les interférences entre les consommateurs (42). Le régime traditionnel de gestion du spectre présente deux inconvénients majeurs. Premièrement, de grandes parties du spectre sous licence sont sous-utilisées. Deuxièmement, ce régime de gestion du spectre commandé et contrôlé est lent à réagir aux changements du marché (5). La détection du spectre (6), la prise en charge des marchés secondaires d'échange de spectre (37), le partage du spectre (12) et l'application des politiques (9) sont toutes des utilisations possibles de la technologie blockchain dans la gestion du spectre (35).

La technologie Blockchain peut être utilisée pour créer un système de détection de spectre sécurisé et permettre une détection collaborative, ce qui améliore la précision des données de détection de spectre. Les opérateurs de réseaux mobiles peuvent utiliser la détection du spectre pour combiner les fréquences vides disponibles avec leurs fréquences sous licence afin d'augmenter la capacité du réseau. La détection collaborative, qui comprend la fusion des résultats de détection de plusieurs capteurs ou utilisateurs secondaires, peut garantir l'efficacité des résultats de détection du spectre. La blockchain a d'abord été utilisée comme système de paiement peer-to-peer. En conséquence, il se prête naturellement à la création d'un système de paiement à spectre complet basé sur une monnaie numérique qui peut être rapidement convertie en monnaie fiduciaire. La technologie Blockchain peut être utilisée pour accomplir les nombreuses fonctions d'une base de données de géolocalisation et les besoins de la gestion du spectre. L'utilisation de la blockchain pour stocker activement des informations sur les bandes de spectre inoccupées et les géolocalisations des utilisateurs devrait accroître l'efficacité de l'accès et de l'utilisation du spectre.

Les bases de données de détection du spectre et de géolocalisation sont les deux principales technologies pour fournir un accès dynamique au spectre. Auparavant, ces approches étaient considérées comme des stratégies distinctes dans les recherches antérieures. Étant donné que la blockchain est une technologie de base de données, elle peut être utilisée pour créer une méthode unifiée dans laquelle les techniques de détection du

spectre et la technologie de base de données de géolocalisation fonctionnent en tandem. Un cadre de gestion dynamique du spectre plus robuste résultera de la combinaison de ces deux stratégies d'accès au spectre. Il est également nécessaire d'étudier l'intégration des blockchains avec les réseaux de communication. Le réseau blockchain pourrait être configuré comme une superposition au-dessus du réseau de communication, permettant aux nœuds du réseau de communication de fonctionner comme des nœuds complets sur le réseau blockchain. Cependant, cette structure de réseau est énergivore et nécessite un canal de contrôle spécialisé pour transférer les blocs et les transactions sur les réseaux blockchain (29).

4 Défis ouverts

Afin de produire des applications basées sur la blockchain plus utilisables et plus performantes, plusieurs difficultés industrielles non résolues doivent être résolues et étudiées plus avant (Tableau 1).

5 Conclusion

Cette recherche visait à faire la lumière sur certaines études récentes impliquant l'intégration de la technologie blockchain dans trois domaines importants et modernes : les réseaux sans fil, l'Internet des objets (IoT) et les réseaux électriques intelligents. Nous avons proposé des exemples de technologies de blockchain connexes pour chaque domaine, en mettant l'accent sur les avantages, les limites et les problèmes associés à chacun. Le tableau 2 résume les solutions qui ont été passées en revue.

Comme perspectives possibles, Il serait intéressant d'étudier comment les techniques d'apprentissage automatique (ML) (2; 32; 7) peuvent être utilisées dans le contexte de la technologie Blockchain pour augmenter les niveaux de sécurité et pour augmenter les performances des systèmes basés sur la blockchain considérés. Il sera également important d'appliquer des approches de test formelles (20; 30; 8; 31; 22; 19) pour les systèmes basés sur la blockchain afin d'améliorer leur qualité et d'augmenter leur robustesse (23; 25; 24).

Références

- [1] Joe Abou Jaoude and Raafat George Saade. Blockchain applications—usage in different domains. *IEEE Access*, 7 :45360–45381, 2019.
- [2] Qasem Abu Al-Haija, Moez Krichen, and Wejdan Abu Elhaija. Machine-learning-based darknet traffic detection system for iot applications. *Electronics*, 11(4) :556, 2022.
- [3] Jameela Al-Jaroodi and Nader Mohamed. Blockchain in industries : A survey. *IEEE Access*, 7 :36500–36515, 2019.

TAB. 1 – *Défis ouverts.*

Avantages de la solution	Lorsqu'elle est appliquée pour remplacer les solutions existantes, la blockchain est une nouvelle technologie qui a le potentiel de déstabiliser le marché en introduisant des moyens révolutionnaires susceptibles de transformer la société. Par conséquent, il est essentiel d'établir si une blockchain est vraiment nécessaire pour une application donnée (43).
Mise en œuvre correcte	Parce que la blockchain est une méthode polyvalente de manipulation de données qui peut être utilisée dans divers systèmes pour diverses raisons, sa mise en œuvre a un certain degré de compréhension ou de maturité concernant son importance et les compromis. Ainsi, son intégration dans différentes applications nécessite une étude approfondie et complète (33).
Mécanisme de test standard	Il est essentiel d'adopter des applications basées sur la blockchain pour divers domaines.
Résilience aux risques de sécurité	La résilience aux risques de sécurité doit être formellement prouvée car la blockchain peut être confrontée à des dysfonctionnements dus à la conception des systèmes ou à des cyberattaques destinées à compromettre sa sécurité avec des applications à grande échelle.
Évolutivité	Ce problème est soulevé car les transactions basées sur la blockchain sont très lentes à être traitées et vérifiées. Le traitement des transactions dépend des performances du système de traitement. Dans (13), les limites des méthodes de mise à l'échelle proposées sont soulignées.
Intégration avec d'autres systèmes	Ce problème a un impact direct sur les organisations désireuses d'adopter des solutions compatibles avec la blockchain. En effet, le processus d'intégration impliquera des coûts liés au changement d'infrastructure, au personnel formé, aux développeurs spécialisés et aux attentes de la direction (13).
Défis énergétiques	L'utilisation de la blockchain nécessitera sans aucun doute une consommation d'énergie bien supérieure à celle habituelle. Ce défi se transforme en un problème environnemental lorsque l'énergie utilisée dépasse la puissance de charge et que l'équipement est pleinement utilisé (10).
Les questions réglementaires	Les réglementations sont extrêmement importantes pour généraliser, réglementer et accepter l'utilisation de solutions compatibles avec la blockchain.
Stockage	L'intégration de la blockchain avec des applications gourmandes en données -telles que celles basées sur l'IoT- pose le problème du stockage des données. En effet, la blockchain stocke les données dans des blocs qui ne peuvent pas supporter un grand volume de données (46; 45).

TAB. 2 – *Résumé des principaux résultats concernant l'utilisation de Blockchain dans différents domaines.*

Domaine	Papiers	Applications principales	Limites et risques
Réseaux sans fil	(14; 15; 42; 5; 6; 37; 12; 9; 35; 29)	1. Accroître l'accès au spectre et l'efficacité de son utilisation 2. Créer un système de détection de spectre sécurisé 3. Améliorer la précision des données de détection du spectre 4. Stockage des bandes de spectre inoccupées et des géolocalisations des utilisateurs 5. Fournir un accès dynamique au spectre 6. Activer la détection collaborative.	1. Grande consommatrice d'énergie 2. Nécessite un canal de contrôle spécialisé pour le transfert de blocs et de transactions sur les réseaux blockchain.

- [4] Azza Allouch, Omar Cheikhrouhou, Anis Koubâa, Khalifa Toumi, Mohamed Khargui, and Tuan Nguyen Gia. Utm-chain : blockchain-based secure unmanned traffic management for internet of drones. *Sensors*, 21(9) :3049, 2021.
- [5] Peter Anker. From spectrum management to spectrum governance. *Telecommunications Policy*, 41(5-6) :486–497, 2017.
- [6] Thirasara Ariyaratna, Prabodha Harankahadeniya, Saarraah Istihikar, Nethmi Pathirana, HMN Dilum Bandara, and Arjuna Madanayake. Dynamic spectrum access via smart contracts on blockchain. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [7] Ouissem Ben Fredj, Alaeddine Mihoub, Moez Krichen, Omar Cheikhrouhou, and Abdelouahid Derhab. Cybersecurity attack prediction : a deep learning approach. In *13th International Conference on Security of Information and Networks*, pages 1–6, 2020.
- [8] Nathalie Bertrand, Amélie Stainer, Thierry Jéron, and Moez Krichen. A game approach to determinize timed automata. *Formal Methods in System Design*, 46(1) :42–80, 2015.
- [9] Maqsood Ahamed Abdul Careem and Aveek Dutta. Sensechain : Blockchain based reputation system for distributed spectrum enforcement. In *2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 1–10. IEEE, 2019.
- [10] Sanjeev Kumar Dwivedi, Priyadarshini Roy, Chinky Karda, Shalini Agrawal, and Ruhul Amin. Blockchain-based internet of things and industrial iot : a comprehensive survey. *Security and Communication Networks*, 2021, 2021.
- [11] Tarek Frikha, Faten Chaabane, Nakhir Aouinti, Omar Cheikhrouhou, Nader Ben Amor, and Abdelfateh Kerrouche. Implementation of blockchain consen-

- sus algorithm on embedded architecture. *Security and Communication Networks*, 2021, 2021.
- [12] Sicheng Han and Xiaorong Zhu. Blockchain based spectrum sharing algorithm. In *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pages 936–940. IEEE, 2019.
- [13] Md Rafiqul Islam, Muhammad Mahbubur Rahman, Md Mahmud, Mohammed Aatur Rahman, Muslim Har Sani Mohamad, et al. A review on blockchain security issues and challenges. In *2021 IEEE 12th Control and System Graduate Research Colloquium*, pages 227–232. IEEE, 2021.
- [14] Rateb Jabbar, Eya Dhib, Ahmed ben Said, Moez Krichen, Noora Fetais, Esmat Zaidan, and Kamel Barkaoui. Blockchain technology for intelligent transportation systems : A systematic literature review. *IEEE Access*, 2022.
- [15] Rateb Jabbar, Noora Fetais, Mohamed Kharbeche, Moez Krichen, Kamel Barkaoui, and Mohammed Shinoy. Blockchain for the internet of vehicles : How to use blockchain to secure vehicle-to-everything (v2x) communication and payment ? *IEEE Sensors Journal*, 2021.
- [16] Faisal Jamil, Omar Cheikhrouhou, Harun Jamil, Anis Koubaa, Abdelouahid Derhab, and Mohamed Amine Ferrag. Petroblock : a blockchain-based payment mechanism for fueling smart vehicles. *Applied Sciences*, 11(7) :3055, 2021.
- [17] Sumaira Johar, Naveed Ahmad, Warda Asher, Haitham Cruickshank, and Amad Durrani. Research and applied perspective to blockchain technology : A comprehensive survey. *Applied Sciences*, 11(14) :6252, 2021.
- [18] Mahtab Kouhizadeh and Joseph Sarkis. Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains. *Sustainability*, 10(10) :3652, 2018.
- [19] Moez Krichen. *Model-based testing for real-time systems*. PhD thesis, PhD thesis, PhD thesis, Universit Joseph Fourier (December 2007), 2007.
- [20] Moez Krichen. *Contributions to model-based testing of dynamic and distributed real-time systems*. PhD thesis, École Nationale d’Ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2018.
- [21] Moez Krichen, Meryem Ammi, Alaeddine Mihoub, and Mutiq Almutiq. Blockchain for modern applications : A survey. *Sensors*, 22(14) :5274, 2022.
- [22] Moez Krichen and Stavros Tripakis. State identification problems for timed automata. In *IFIP International Conference on Testing of Communicating Systems*, pages 175–191. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [23] Mariam Lahami and Moez Krichen. A survey on runtime testing of dynamically adaptable and distributed systems. *Software Quality Journal*, 29(2) :555–593, 2021.
- [24] Mariam Lahami, Moez Krichen, Hajer Barhoumi, and Mohamed Jmaiel. Selective test generation approach for testing dynamic behavioral adaptations. In *IFIP International Conference on Testing Software and Systems*, pages 224–239. Springer, Cham, 2015.
- [25] Mariam Lahami, Moez Krichen, and Mohamed Jmaïel. Runtime testing approach

- of structural adaptations for dynamic and distributed systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 51(4) :259–272, 2015.
- [26] Victoria Louise Lemieux. Trusting records : is blockchain technology the answer ? *Records Management Journal*, 2016.
 - [27] Kevin Leyton-Brown, Paul Milgrom, and Ilya Segal. Economics and computer science of a radio spectrum reallocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(28) :7202–7209, 2017.
 - [28] Xiaoqi Li, Peng Jiang, Ting Chen, Xiapu Luo, and Qiaoyan Wen. A survey on the security of blockchain systems. *Future Generation Computer Systems*, 107 :841–853, 2020.
 - [29] Ying-Chang Liang. *Dynamic spectrum management : from cognitive radio to blockchain and artificial intelligence*. Springer Nature, 2020.
 - [30] Afef Jmal Maâlej, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Conformance testing of ws-bpel compositions under various load conditions. In *2012 IEEE 36th annual computer software and applications conference*, pages 371–371. IEEE, 2012.
 - [31] Afef Jmal Maâlej, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Model-based conformance testing of ws-bpel compositions. In *2012 IEEE 36th annual computer software and applications conference workshops*, pages 452–457. IEEE, 2012.
 - [32] Alaeddine Mihoub, Ouissem Ben Fredj, Omar Cheikhrouhou, Abdelouahid Derhab, and Moez Krichen. Denial of service attack detection and mitigation for internet of things using looking-back-enabled machine learning techniques. *Computers & Electrical Engineering*, 98 :107716, 2022.
 - [33] Ahmed Afif Monrat, Olov Schelén, and Karl Andersson. A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 2019.
 - [34] Satoshi Nakamoto. Bitcoin : A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, page 21260, 2008.
 - [35] Yiyang Pei, Shisheng Hu, Feng Zhong, Dusit Niyato, and Ying-Chang Liang. Blockchain-enabled dynamic spectrum access : cooperative spectrum sensing, access and mining. In *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
 - [36] Marc Pilkington. Blockchain technology : principles and applications. In *Research handbook on digital transformations*. Edward Elgar Publishing, 2016.
 - [37] Junfei Qiu, David Grace, Guoru Ding, Junnan Yao, and Qihui Wu. Blockchain-based secure spectrum trading for unmanned-aerial-vehicle-assisted cellular networks : An operator’s perspective. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1) :451–466, 2019.
 - [38] C. V. Ravishankar and K. S. Kavitha. *Blockchain Applications that are Transforming the Society*, pages 23–39. Springer International Publishing, Cham, 2022.
 - [39] Khaled Salah, M Habib Ur Rehman, Nishara Nizamuddin, and Ala Al-Fuqaha. Blockchain for ai : Review and open research challenges. *IEEE Access*, 7 :10127–10149, 2019.

- [40] Linda Schilling and Harald Uhlig. Some simple bitcoin economics. *Journal of Monetary Economics*, 106 :16–26, 2019.
- [41] Gautam Srivastava, Shalini Dhar, Ashutosh Dhar Dwivedi, and Jorge Crichigno. Blockchain education. In *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [42] Martin BH Weiss, Kevin Werbach, Douglas C Sicker, and Carlos E Caicedo Bastidas. On the application of blockchains to spectrum management. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(2) :193–205, 2019.
- [43] Karl Wüst and Arthur Gervais. Do you need a blockchain? In *2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)*, pages 45–54. IEEE, 2018.
- [44] Bo Yan, Zijiang Yang, Yitian Ren, Xing Tan, and Eric Liu. Microblog sentiment classification using parallel svm in apache spark. In *2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, pages 282–288. IEEE, 2017.
- [45] Bessem Zaabar, Omar Cheikhrouhou, Meryem Ammi, Ali Ismail Awad, and Mohamed Abid. Secure and privacy-aware blockchain-based remote patient monitoring system for internet of healthcare things. In *2021 17th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 200–205. IEEE, 2021.
- [46] Bessem Zaabar, Omar Cheikhrouhou, Faisal Jamil, Meryem Ammi, and Mohamed Abid. Healthblock : A secure blockchain-based healthcare data management system. *Computer Networks*, 200 :108500, 2021.
- [47] Zibin Zheng, Shaoan Xie, Hong-Ning Dai, Xiangping Chen, and Huaimin Wang. Blockchain challenges and opportunities : A survey. *International Journal of Web and Grid Services*, 14(4) :352–375, 2018.