



HAL
open science

Intégration de la Blockchain et de l'Intelligence Artificielle dans les Systèmes de Transport

Moez Krichen

► **To cite this version:**

Moez Krichen. Intégration de la Blockchain et de l'Intelligence Artificielle dans les Systèmes de Transport. 2024. hal-04436583

HAL Id: hal-04436583

<https://hal.science/hal-04436583>

Preprint submitted on 3 Feb 2024

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.

Intégration de la Blockchain et de l'Intelligence Artificielle dans les Systèmes de Transport

Moez Krichen

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

Résumé. Cet article explore l'intégration de la Blockchain et de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les systèmes de transport, en se concentrant sur les Véhicules Autonomes (VA) et les Systèmes de Transport Intelligents (STI). Nous évaluons comment cette combinaison technologique peut améliorer la sécurité, l'efficacité et la fiabilité, tout en reconnaissant les défis techniques, de confidentialité et éthiques. La Blockchain offre un registre transparent et immuable, facilitant la gestion des données et améliorant la coordination entre les véhicules. L'IA, avec ses capacités d'apprentissage et d'adaptation, optimise les performances des VA et des STI. Cependant, l'intégration pose des défis de scalabilité, de consommation énergétique et de sécurité des données. Nous discutons également des implications éthiques, telles que l'impact sur la vie privée et la surveillance. L'article souligne la nécessité d'une collaboration entre chercheurs, développeurs et régulateurs pour adresser ces enjeux. En conclusion, l'adoption de la Blockchain et de l'IA dans les transports promet des avancées significatives, mais requiert une approche prudente et multidisciplinaire pour naviguer entre les bénéfices technologiques et les considérations sociétales.

1 Introduction

L'intégration de la Blockchain (21; 16; 18; 26) et de l'Intelligence Artificielle (IA) (28; 4; 27; 14; 33; 2; 5; 1) dans les systèmes de transport représente une avancée majeure vers la réalisation de systèmes de transport autonomes et intelligents. Ces technologies promettent non seulement d'améliorer la sécurité, l'efficacité et la confidentialité des Véhicules Autonomes (VA) et des Systèmes de Transport Intelligents (STI), mais elles offrent également la possibilité de transformer radicalement la manière dont les informations sont gérées, partagées et sécurisées à travers les réseaux de transport. Cet article vise à synthétiser la littérature existante pour mettre en lumière les progrès réalisés, identifier les défis persistants et explorer les orientations futures possibles dans ce domaine en pleine évolution (30; 23).

La Blockchain, avec sa capacité à offrir une transparence et une sécurité améliorées grâce à des registres distribués et immuables, est particulièrement prometteuse pour garantir la fiabilité et l'intégrité des données dans les systèmes de transport (20; 15). Parallèlement, l'IA peut analyser ces vastes ensembles de données pour optimiser les

itinéraires, prévoir les besoins de maintenance et améliorer l'expérience utilisateur, rendant les systèmes de transport plus intelligents et plus réactifs aux besoins des utilisateurs.

Toutefois, malgré le potentiel considérable, l'intégration effective de la Blockchain et de l'IA dans les systèmes de transport reste confrontée à des défis importants. Ces défis comprennent des questions techniques liées à la scalabilité et à la consommation d'énergie, des préoccupations juridiques et réglementaires concernant la confidentialité des données et la responsabilité en cas d'accident, ainsi que des obstacles sociaux et économiques à l'adoption généralisée de ces technologies.

Cet article examine les contributions significatives dans le domaine, discute des implications pratiques de ces technologies pour l'avenir des transports et propose des recommandations pour surmonter les obstacles à leur intégration. En abordant ces enjeux, nous cherchons à fournir un aperçu complet de l'état actuel de l'art et à ouvrir des voies pour des recherches futures qui pourraient faciliter l'avènement de systèmes de transport plus sûrs, plus efficaces et plus durables.

2 Sécurité des Véhicules Autonomes

La sécurité des Véhicules Autonomes (VA) est une préoccupation majeure qui englobe à la fois la protection contre les cyberattaques et la garantie de la confidentialité des données des usagers. L'article de (3) apporte une contribution significative en classant les cyberattaques importantes ciblant les composants critiques et les voies de communication des VA. Cette classification souligne l'importance d'adopter des mesures de sécurité robustes pour protéger ces systèmes complexes contre les menaces potentielles, qui peuvent compromettre non seulement la confidentialité des données des utilisateurs mais également leur sécurité physique.

En explorant les solutions offertes par la Blockchain (BC) et l'Intelligence Artificielle (IA) pour renforcer la sécurité des VA, l'article met en lumière les avantages distincts de ces technologies. La Blockchain, par exemple, offre un moyen sécurisé et décentralisé de stocker et de partager les données, réduisant ainsi les risques de falsification et améliorant la traçabilité des transactions. Ceci est particulièrement pertinent pour les systèmes de VA où la confiance et la transparence dans le partage des données sont cruciales pour la sécurité et l'efficacité opérationnelle. D'autre part, l'IA peut jouer un rôle crucial dans la détection et la neutralisation des cyberattaques en temps réel, grâce à sa capacité à apprendre et à s'adapter à de nouveaux modèles de menaces.

Cependant, l'intégration de la BC et de l'IA dans les systèmes de VA n'est pas exempte de défis. L'article souligne les problèmes liés à la scalabilité des solutions Blockchain, aux coûts élevés associés à la mise en œuvre de ces technologies, à l'intégration avec les systèmes existants, et à la consommation d'énergie. De plus, les questions juridiques et éthiques liées à la confidentialité des données et à la responsabilité en cas d'incident impliquant des VA doivent être soigneusement examinées.

Malgré ces défis, l'approche proposée par (3) pour la sécurité des VA à l'aide de la BC et de l'IA offre une voie prometteuse pour l'avenir. Pour naviguer avec succès dans ce paysage complexe, une collaboration étroite entre les chercheurs, les développeurs de technologies, les fabricants de véhicules, et les organismes réglementaires est essentielle.

En travaillant ensemble pour surmonter les obstacles techniques et réglementaires, il est possible de réaliser le plein potentiel des VA en tant que composants clés des systèmes de transport intelligents et sécurisés de demain.

3 Réseaux de Transport et Blockchain

La convergence de la blockchain et de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les réseaux de transport ouvre des horizons prometteurs pour révolutionner les industries du transport et de la logistique. L'étude menée par (32) fournit une analyse approfondie de cette fusion technologique, mettant en évidence les avantages significatifs ainsi que les défis potentiels de leur intégration dans les systèmes de transport.

L'un des principaux avantages de l'intégration de la blockchain dans les réseaux de transport réside dans sa capacité à sécuriser les données et à améliorer la transparence des transactions. Grâce à son architecture décentralisée, la blockchain offre un moyen fiable pour enregistrer, stocker et partager les données sans nécessiter une autorité centrale de confiance. Cela a des implications profondes pour les réseaux de transport, où la fiabilité des informations et la traçabilité des marchandises sont essentielles. De plus, l'immutabilité des registres de la blockchain assure que les données ne peuvent être altérées ou effacées, augmentant ainsi la sécurité contre les fraudes et les cyberattaques.

Parallèlement, l'IA peut compléter la blockchain en fournissant des analyses avancées et des capacités de prise de décision en temps réel. Dans les réseaux de transport, l'IA peut être utilisée pour optimiser les itinéraires, prévoir les délais de livraison avec plus de précision et améliorer l'efficacité opérationnelle. L'IA peut également jouer un rôle crucial dans la maintenance prédictive des véhicules, en analysant les données collectées pour identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne conduisent à des pannes.

Cependant, l'intégration de la blockchain et de l'IA dans les réseaux de transport n'est pas sans défis. Le rapport de (32) souligne plusieurs obstacles à surmonter, notamment la scalabilité des solutions blockchain face à des volumes élevés de transactions et de données. De plus, les coûts associés à la mise en œuvre et à la maintenance de ces technologies peuvent être prohibitifs pour certaines organisations. Les questions de confidentialité des données et de conformité réglementaire représentent également des préoccupations majeures, étant donné que les informations sensibles doivent être protégées tout en respectant les lois en vigueur.

En dépit de ces défis, l'intégration de la blockchain et de l'IA dans les réseaux de transport présente un potentiel considérable pour transformer l'industrie. Pour exploiter pleinement ce potentiel, il est essentiel d'adopter une approche collaborative impliquant les acteurs clés du secteur, y compris les fournisseurs de technologies, les opérateurs de transport, les régulateurs et les consommateurs. Une telle collaboration permettra de développer des normes communes, de partager les meilleures pratiques et d'innover de manière responsable pour construire les systèmes de transport intelligents de demain.

4 Apprentissage Fédéré et Blockchain dans les Réseaux Véhiculaires

L'intégration de l'Apprentissage Fédéré (FL) et de la blockchain dans les réseaux véhiculaires, notamment les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET), représente une avancée prometteuse dans la recherche sur les transports intelligents. L'étude réalisée par (12) offre une analyse détaillée de cette intégration, mettant en exergue les synergies potentielles entre ces deux technologies pour améliorer la sécurité, la confidentialité et l'efficacité des communications dans les VANET.

L'apprentissage fédéré, en permettant aux modèles d'apprentissage automatique d'être entraînés sur de multiples dispositifs sans nécessiter le transfert de données brutes, offre une solution puissante pour préserver la confidentialité des données des utilisateurs. Dans le contexte des VANET, cela signifie que les véhicules peuvent apprendre de l'expérience collective sans partager leurs données sensibles, réduisant ainsi les risques de fuites de données et d'attaques sur la vie privée.

L'ajout de la blockchain à cette configuration introduit un niveau supplémentaire de sécurité et de fiabilité. La blockchain peut servir de registre immuable pour enregistrer les contributions de chaque véhicule au processus d'apprentissage fédéré, garantissant ainsi l'intégrité et la transparence de l'entraînement des modèles. De plus, elle peut faciliter les transactions sécurisées et vérifiables pour la compensation des participants, encourageant ainsi la collaboration dans l'écosystème VANET.

Cependant, (12) identifie également plusieurs défis inhérents à l'intégration de la FL et de la blockchain dans les VANET. Parmi ces défis figurent la gestion de la consommation d'énergie associée aux opérations de la blockchain, la nécessité d'assurer des communications en temps réel dans un environnement hautement dynamique et la scalabilité des solutions proposées face à l'augmentation du nombre de véhicules connectés.

Pour adresser ces enjeux, la recherche suggère l'exploration de techniques d'optimisation avancées et l'adoption de protocoles de consensus plus efficaces spécifiquement conçus pour les réseaux véhiculaires. Il est également proposé de développer des mécanismes d'incitation innovants pour encourager la participation active des véhicules au processus d'apprentissage fédéré, tout en minimisant leur consommation d'énergie et en garantissant la rapidité des transactions via la blockchain.

En conclusion, l'intégration de l'apprentissage fédéré et de la blockchain dans les VANET ouvre des perspectives fascinantes pour l'avancement des systèmes de transport intelligents. Toutefois, la réalisation de son plein potentiel nécessite une collaboration étroite entre chercheurs, développeurs, constructeurs automobiles et décideurs pour surmonter les défis techniques et réglementaires, tout en assurant une adoption éthique et respectueuse de la vie privée des technologies impliquées.

5 Gestion des Données de Transport

Dans le contexte actuel, où les données jouent un rôle crucial dans l'optimisation des systèmes de transport, la proposition d'un cadre MORFLB (Multi-Objective Reinforcement Federated Learning Blockchain) par (29) représente une avancée significative pour

le traitement sécurisé et efficace des données de transport. Ce cadre vise à exploiter la puissance de l'apprentissage fédéré et de la blockchain pour gérer les données générées par les divers acteurs des systèmes de transport, y compris les véhicules autonomes, les capteurs routiers et les systèmes de gestion du trafic.

L'utilisation de l'apprentissage fédéré dans le cadre MORFLB permet une collaboration décentralisée entre les nœuds informatiques sans nécessiter le partage direct des données. Cela assure la confidentialité et la sécurité des informations sensibles des utilisateurs, tout en permettant aux modèles d'apprentissage machine d'être entraînés de manière plus globale et robuste. Grâce à cette approche, il est possible d'améliorer continuellement les algorithmes de gestion du trafic et de prédiction des comportements sur la route, sans compromettre la vie privée des individus.

Parallèlement, l'intégration de la blockchain offre un mécanisme fiable et transparent pour l'enregistrement et la vérification des transactions entre les parties prenantes, assurant l'intégrité des données dans l'écosystème de transport. La blockchain agit comme un registre immuable, ce qui rend les données à l'abri des altérations et des fraudes. De plus, elle facilite les échanges sécurisés et automatisés grâce à l'utilisation de contrats intelligents, permettant ainsi une gestion efficace des ressources et des services dans les réseaux de transport.

Toutefois, la mise en œuvre du cadre MORFLB présente des défis, notamment en termes de scalabilité de la blockchain face à l'énorme volume de données générées dans les systèmes de transport et de la nécessité d'assurer des temps de réponse rapides pour le traitement en temps réel. De plus, l'harmonisation des objectifs d'apprentissage fédéré avec les mécanismes de consensus de la blockchain nécessite une attention particulière pour optimiser les performances et la sécurité du système.

Pour relever ces défis, (29) suggère le développement de nouvelles architectures de blockchain optimisées pour les applications de transport et l'exploration de stratégies d'apprentissage fédéré adaptées aux environnements dynamiques. Il est également crucial d'établir des normes et des protocoles clairs pour la gestion des données et la coopération entre les différents acteurs du système de transport.

En conclusion, le cadre MORFLB offre une perspective prometteuse pour la gestion sécurisée et efficace des données dans les systèmes de transport modernes. En poursuivant le développement et l'adaptation de cette approche, il est possible de réaliser des avancées significatives dans la création de réseaux de transport intelligents, durables et respectueux de la vie privée.

6 Systèmes de Transport Publics Intelligents

L'innovation dans les systèmes de transport public intelligent joue un rôle clé dans l'amélioration de l'efficacité, de la sécurité et de la durabilité des services de mobilité urbaine. L'étude réalisée par (25) met en lumière l'importance cruciale de protéger ces systèmes contre les cyberattaques, en se concentrant spécifiquement sur la menace des attaques par déni de service distribué (DDoS). En intégrant la technologie blockchain et les techniques d'apprentissage profond, cette recherche propose une solution novatrice pour renforcer la sécurité des systèmes de transport public intelligent, marquant une étape significative vers la réalisation de réseaux de transport public résilients et fiables.

L'application de la blockchain dans ce contexte offre une méthode transparente et sécurisée pour enregistrer les transactions et les interactions au sein du système de transport public, créant un registre immuable qui peut servir de preuve en cas d'attaque. Cette caractéristique de la blockchain améliore non seulement la sécurité des données mais aussi la confiance des utilisateurs dans le système, en assurant que toutes les opérations sont vérifiables et irréversibles.

D'autre part, l'utilisation de l'apprentissage profond permet d'identifier et de contrer les attaques DDoS de manière proactive. En analysant les modèles de trafic et en détectant les anomalies, les algorithmes d'apprentissage profond peuvent rapidement identifier les tentatives d'attaque avant qu'elles ne parviennent à perturber le service. Cette capacité à anticiper et à réagir aux menaces en temps réel est essentielle pour maintenir la continuité et la qualité des services de transport public.

Cependant, l'intégration de ces technologies avancées dans les systèmes de transport public pose plusieurs défis. Premièrement, la mise en œuvre de la blockchain dans des environnements opérationnels réels nécessite une infrastructure technique robuste et une adaptation aux spécificités des réseaux de transport public. Deuxièmement, le développement et l'entraînement de modèles d'apprentissage profond efficaces demandent une grande quantité de données et des ressources informatiques importantes, ainsi qu'une expertise approfondie en matière de cybersécurité et d'IA.

Pour surmonter ces obstacles, (25) recommande une approche collaborative impliquant les autorités de transport, les entreprises technologiques, les chercheurs et les organismes de réglementation. En travaillant ensemble, ces acteurs peuvent partager des ressources, des connaissances et des meilleures pratiques pour développer des solutions de sécurité évolutives qui répondent aux besoins spécifiques des systèmes de transport public intelligent. De plus, des efforts continus en matière de recherche et développement sont nécessaires pour améliorer les capacités de détection des menaces et optimiser les performances des systèmes blockchain et d'apprentissage profond.

En résumé, la protection des systèmes de transport public intelligent contre les cyberattaques est une priorité absolue pour garantir leur fiabilité et leur efficacité. L'approche innovante proposée par (25), combinant la blockchain et l'apprentissage profond, offre une voie prometteuse pour atteindre cet objectif. Toutefois, la réussite de cette intégration dépendra de la collaboration étroite entre les différents acteurs du domaine des transports et de la technologie, ainsi que de l'engagement continu envers la recherche et l'innovation dans la cybersécurité et les technologies avancées.

7 Gestion du Trafic Routier

L'efficacité de la gestion du trafic routier est cruciale pour réduire la congestion, minimiser les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la sécurité des usagers de la route. Le modèle de Système de Gestion du Trafic Routier Intelligent (SRTMS) proposé par (31) représente une avancée significative dans ce domaine, grâce à l'intégration innovante de l'Intelligence Artificielle (IA), de la Blockchain et de l'Internet des Objets (IoT). Cette approche multidimensionnelle vise à aborder les défis complexes de la gestion du trafic en offrant des solutions dynamiques et adaptatives qui tirent parti des dernières avancées technologiques.

L'IA joue un rôle central dans le SRTMS, en analysant les données de trafic en temps réel pour prédire les schémas de congestion et proposer des ajustements optimaux des feux de signalisation et des itinéraires alternatifs. Cette capacité à apprendre et à s'adapter continuellement à partir de données variées permet d'optimiser le flux de trafic et de réagir proactivement aux conditions changeantes sur la route.

Parallèlement, la Blockchain apporte une couche supplémentaire de sécurité et de fiabilité au système. En enregistrant toutes les transactions et les décisions liées à la gestion du trafic dans un registre distribué et immuable, la Blockchain garantit l'intégrité des données et facilite la transparence et la responsabilité entre les différentes parties prenantes, y compris les autorités de régulation, les fournisseurs de services de transport et les usagers de la route.

L'intégration de l'IoT enrichit davantage le SRTMS en fournissant une infrastructure robuste pour la collecte de données en temps réel à partir d'une vaste gamme de capteurs et de dispositifs connectés. Ces données, allant des conditions météorologiques aux informations sur les accidents, sont essentielles pour alimenter les algorithmes d'IA et soutenir les décisions de gestion du trafic. De plus, l'IoT permet une interaction directe avec les véhicules et les infrastructures urbaines, facilitant l'implémentation des recommandations du système en matière de gestion du trafic.

Cependant, la mise en œuvre d'un SRTMS aussi sophistiqué soulève plusieurs défis, notamment en termes d'intégration des différentes technologies, de protection de la vie privée des données des utilisateurs et de scalabilité du système pour s'adapter à de grandes métropoles. De plus, la réussite de ce système repose sur une collaboration étroite entre les entités gouvernementales, les entreprises privées et les citoyens, nécessitant des cadres réglementaires clairs et une acceptation sociale de ces nouvelles technologies.

Pour relever ces défis, (31) souligne l'importance d'une approche évolutive et modulaire dans le déploiement du SRTMS, permettant des ajustements et des améliorations progressifs en fonction des retours d'expérience et des avancées technologiques. De plus, des mécanismes robustes de protection des données doivent être intégrés dès la conception pour assurer la confidentialité et la sécurité des informations des utilisateurs.

En conclusion, le modèle SRTMS propose une vision ambitieuse pour transformer la gestion du trafic routier grâce à l'IA, la Blockchain et l'IoT. Bien que sa mise en œuvre présente des défis, les avantages potentiels en termes d'efficacité du trafic, de sécurité routière et de durabilité environnementale justifient pleinement les efforts déployés pour surmonter ces obstacles et réaliser cette vision du futur de la mobilité urbaine.

8 Gestion du Trafic dans les Villes Intelligentes

Dans l'ère actuelle de l'urbanisation rapide, la gestion efficace du trafic dans les villes intelligentes devient de plus en plus cruciale pour améliorer la qualité de vie des citoyens, réduire les émissions de carbone et optimiser l'utilisation des infrastructures urbaines. L'étude menée par (11) explore comment les technologies de l'Intelligence Artificielle et de l'Internet des Objets (AIoT) peuvent être utilisées conjointement pour transformer la gestion du trafic véhiculaire dans les villes intelligentes. Cette combinaison prometteuse vise à créer des systèmes de gestion du trafic plus réactifs, prédictifs et

adaptatifs, capables de répondre dynamiquement aux conditions changeantes du trafic urbain.

Les technologies AIoT, en intégrant l'intelligence artificielle avec les vastes réseaux de capteurs et dispositifs IoT, permettent une collecte et une analyse de données en temps réel à une échelle sans précédent. Cette capacité d'analyse en temps réel ouvre la porte à des applications innovantes dans la gestion du trafic, telles que la prédiction de la congestion, l'optimisation des signaux de circulation, et la gestion dynamique des voies de circulation. Par exemple, en analysant les données de trafic en temps réel, un système AIoT peut ajuster les feux de circulation pour réduire les embouteillages ou conseiller les conducteurs sur les meilleurs itinéraires à prendre, réduisant ainsi le temps de trajet et les émissions polluantes.

De plus, l'application de l'IA dans les systèmes AIoT permet d'identifier les tendances et les modèles de mobilité urbaine, facilitant la planification à long terme des infrastructures de transport et l'aménagement urbain. Les villes peuvent ainsi anticiper les besoins futurs en matière de transport et adapter leurs investissements en conséquence, améliorant l'efficacité globale du réseau de transport urbain.

Cependant, l'implémentation des technologies AIoT dans la gestion du trafic des villes intelligentes n'est pas sans défis. Les problèmes de confidentialité et de sécurité des données sont au premier plan, étant donné la quantité considérable d'informations personnelles collectées par les capteurs et dispositifs IoT. De plus, l'intégration réussie de ces technologies nécessite une infrastructure de communication robuste et sécurisée pour supporter le transfert de données volumineux et en temps réel entre les différents composants du système AIoT.

Pour surmonter ces obstacles, (11) souligne l'importance d'adopter des normes de sécurité strictes et des protocoles de protection de la vie privée dès la conception des systèmes AIoT. De même, la collaboration entre les municipalités, les entreprises technologiques, les universités et les citoyens est essentielle pour développer des solutions de gestion du trafic qui soient non seulement technologiquement avancées mais aussi socialement acceptables et respectueuses de la vie privée des individus.

En conclusion, l'intégration des technologies AIoT dans la gestion du trafic offre une opportunité sans précédent pour améliorer l'efficacité des transports urbains. Bien que des défis significatifs demeurent, l'approche innovante explorée par (11) représente une voie prometteuse vers la réalisation de systèmes de transport urbain plus intelligents, durables et centrés sur l'humain.

9 Stockage et Inférence des Modèles

Dans le domaine en évolution rapide de l'intelligence artificielle et de la blockchain, le stockage et l'inférence des modèles deviennent des aspects critiques, particulièrement en ce qui concerne la sécurité et l'efficacité des systèmes. L'innovation présentée par (13), qui combine les capacités du système de fichiers interplanétaires (IPFS) avec la technologie blockchain dans un sous-réseau dédié, marque un progrès significatif dans cette direction. Cette approche vise à tirer parti de la décentralisation et de la résilience de la blockchain et de l'IPFS pour offrir une solution robuste au stockage et à l'inférence

des modèles d'IA, tout en abordant les défis liés à la sécurité des données et à l'efficacité du traitement.

Le recours à la blockchain dans ce contexte assure l'intégrité et la vérifiabilité des modèles d'IA stockés, offrant un cadre dans lequel chaque modification ou mise à jour du modèle est enregistrée de manière transparente et immuable. Cette caractéristique est essentielle pour maintenir la confiance dans les systèmes d'IA, surtout dans des applications critiques telles que la finance, la santé et les infrastructures urbaines intelligentes, où la précision et la fiabilité des modèles sont primordiales.

Parallèlement, l'utilisation de l'IPFS permet de surmonter certains des inconvénients inhérents à la blockchain, tels que les limitations de stockage et les coûts élevés associés à la gestion de grandes quantités de données. L'IPFS offre une solution de stockage distribué efficace, réduisant la charge sur la blockchain tout en assurant que les données restent accessibles et sécurisées. Cette combinaison facilite un stockage de modèle à la fois économique et à grande échelle, éliminant les goulets d'étranglement associés aux systèmes centralisés traditionnels.

L'aspect innovant de l'approche de (13) réside également dans sa capacité à faciliter l'inférence des modèles d'IA de manière efficace. En décentralisant le processus d'inférence à travers le sous-réseau blockchain-IPFS, la solution permet des calculs rapides et sécurisés à proximité des sources de données, minimisant ainsi la latence et maximisant la performance du système. Cette méthode d'inférence distribuée est particulièrement avantageuse pour les applications en temps réel, telles que la surveillance de la qualité de l'air urbain ou la gestion du trafic, où des décisions rapides et fondées sur des données sont cruciales.

Néanmoins, la mise en œuvre de cette solution soulève des défis techniques et organisationnels, notamment en termes d'interopérabilité des systèmes, de gouvernance des données et de respect des normes de confidentialité. Le succès de cette innovation dépendra de la collaboration entre les chercheurs, les développeurs, les fournisseurs de services cloud et les régulateurs pour créer un écosystème qui soutient la scalabilité, la sécurité et la conformité réglementaire des solutions de stockage et d'inférence des modèles d'IA.

En conclusion, l'approche proposée par (13) pour le stockage et l'inférence des modèles offre une voie prometteuse vers la résolution des problèmes de sécurité et d'efficacité des systèmes basés sur l'IA. En exploitant les avantages de la blockchain et de l'IPFS, cette solution pave la voie à des applications d'IA plus sûres, transparentes et réactives, capables de répondre aux besoins complexes des sociétés modernes.

10 Combinaison de l'IA, de la Blockchain et des Méthodes Formelles

L'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA), de la Blockchain et des méthodes formelles représente une frontière innovante dans le développement de systèmes informatiques avancés et sécurisés. Cette combinaison vise à exploiter les forces distinctives de chaque technologie pour créer des solutions robustes, fiables et transparentes, par-

ticulièrement dans les domaines où la sécurité des données et la fiabilité des processus sont primordiales (19; 22; 24; 6; 8; 9; 7; 10).

Les méthodes formelles, qui impliquent l'utilisation de techniques mathématiques rigoureuses pour la spécification, le développement et la vérification des systèmes informatiques, offrent un cadre pour garantir la sécurité et la correction des applications de l'IA et de la Blockchain. En appliquant ces méthodes à la conception et à l'analyse des algorithmes d'IA et des architectures de Blockchain, il est possible de détecter et de prévenir les erreurs, les vulnérabilités et les comportements non intentionnels avant leur déploiement (17).

La Blockchain, en tant que technologie de registre distribué, apporte une couche supplémentaire de transparence et de traçabilité aux applications d'IA. En enregistrant les décisions, les transactions et les interactions de manière immuable et vérifiable, la Blockchain permet aux utilisateurs de vérifier l'origine et l'intégrité des données utilisées et générées par les systèmes d'IA. Cela est particulièrement utile dans des contextes tels que la finance, la santé et la chaîne d'approvisionnement, où la confiance dans les données et les processus est essentielle.

L'IA, de son côté, peut considérablement améliorer l'efficacité et la performance des systèmes basés sur la Blockchain. Par exemple, les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être utilisés pour optimiser les protocoles de consensus de la Blockchain, réduire la consommation d'énergie et accélérer les transactions. De plus, l'IA peut analyser les données stockées dans la Blockchain pour en extraire des insights précieux, améliorer la prise de décision et personnaliser les services pour les utilisateurs finaux.

Cependant, l'intégration de l'IA, de la Blockchain et des méthodes formelles soulève des défis significatifs, notamment en termes de complexité de conception, de coûts de mise en œuvre et de compétences spécialisées requises. De plus, les questions éthiques et réglementaires liées à l'utilisation de l'IA et à la gestion des données personnelles dans les systèmes de Blockchain nécessitent une attention particulière.

Pour relever ces défis, une approche multidisciplinaire impliquant des collaborations entre chercheurs en informatique, experts en sécurité, législateurs et parties prenantes de l'industrie est essentielle. Ensemble, ils peuvent développer des cadres réglementaires clairs, concevoir des solutions technologiques équilibrées et former les professionnels aux compétences nécessaires pour naviguer dans cet espace complexe.

En conclusion, la combinaison de l'IA, de la Blockchain et des méthodes formelles offre des perspectives prometteuses pour la création de systèmes informatiques de nouvelle génération. En surmontant les obstacles techniques et éthiques, cette intégration peut conduire à des avancées significatives en termes de sécurité, de fiabilité et d'efficacité, ouvrant la voie à des applications innovantes au service de la société.

11 Conclusion

L'intersection de l'Intelligence Artificielle (IA), de la Blockchain, et des méthodes formelles représente une avancée majeure dans la recherche et le développement de systèmes informatiques sécurisés et efficaces. Tout au long de cet article, nous avons exploré comment ces technologies révolutionnent la gestion du trafic, la sécurité des

véhicules autonomes, les systèmes de transport publics intelligents, et bien plus encore. Chaque technologie apporte ses propres forces dans l'arsenal des solutions pour répondre aux défis complexes des systèmes de transport modernes, offrant des opportunités sans précédent pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la sécurité.

L'intégration de l'IA et de la Blockchain dans le domaine du transport et au-delà promet de transformer radicalement notre manière de concevoir, de gérer et d'interagir avec les systèmes informatiques. L'IA permet une analyse approfondie et une prise de décision en temps réel, la Blockchain assure la sécurité, la transparence et la traçabilité, tandis que les méthodes formelles garantissent la fiabilité et la correction des systèmes. Ensemble, ces technologies créent un écosystème robuste capable de relever les défis contemporains liés à la sécurité des données, à la gestion du trafic et à la prestation de services publics efficaces.

Cependant, les défis associés à leur intégration, notamment en termes de complexité technique, de coûts, de gouvernance des données et de questions éthiques, exigent une attention soutenue. Il est impératif d'adopter une approche collaborative, impliquant des acteurs de divers horizons, pour naviguer dans le paysage réglementaire, développer des solutions technologiques équilibrées et former les professionnels aux compétences nécessaires dans ce domaine interdisciplinaire.

En conclusion, bien que l'intégration de l'IA, de la Blockchain et des méthodes formelles dans les systèmes de transport et d'autres domaines présente des défis significatifs, le potentiel pour des avancées innovantes est immense. En poursuivant la recherche et le développement dans ces technologies, en encourageant la collaboration intersectorielle, et en abordant de manière proactive les considérations éthiques et réglementaires, nous pouvons ouvrir la voie à une nouvelle ère de systèmes informatiques avancés qui sont non seulement intelligents et sécurisés, mais aussi équitables et durables. Le futur des systèmes de transport intelligents et d'autres applications critiques dépend de notre capacité à exploiter pleinement les synergies entre l'IA, la Blockchain et les méthodes formelles, tout en naviguant avec prudence dans leur complexité inhérente.

Références

- [1] Hashem Alyami, Wael Alosaimi, Moez Krichen, and Roobaea Alroobaea. Monitoring social distancing using artificial intelligence for fighting covid-19 virus spread. *International Journal of Open Source Software and Processes (IJOSSP)*, 12(3) :48–63, 2021.
- [2] Rubby Aworka, Lontsi Saadio Cedric, Wilfried Yves Hamilton Adoni, Jérémie Thouakesseh Zoueu, Franck Kalala Mutombo, Charles Lebon Mberi Kimpolo, Tarik Nahhal, and Moez Krichen. Agricultural decision system based on advanced machine learning models for yield prediction : Case of east african countries. *Smart Agricultural Technology*, 2 :100048, 2022.
- [3] Gueltoum Bendiab, Amina Hameurlaine, Georgios Germanos, Nicholas Kolokotronis, and Stavros Shiaeles. Autonomous vehicles security : Challenges and solu-

- tions using blockchain and artificial intelligence. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.
- [4] Zakaria Boulouard, Mariyam Ouaisa, Mariya Ouaisa, Farhan Siddiqui, Mutiq Almutiq, and Moez Krichen. An integrated artificial intelligence of things environment for river flood prevention. *Sensors*, 22(23) :9485, 2022.
 - [5] Olfa Hrizi, Karim Gasmi, Ibtihel Ben Ltaifa, Hamoud Alshammari, Hanen Karamti, Moez Krichen, Lassaad Ben Ammar, and Mahmood A Mahmood. Tuberculosis disease diagnosis based on an optimized machine learning model. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 2022.
 - [6] Rateb Jabbar, Moez Krichen, Noora Fetais, and Kamel Barkaoui. Adopting formal verification and model-based testing techniques for validating a blockchain-based healthcare records sharing system. In *22nd International Conference on Enterprise Information Systems*, pages 261–268. SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2020.
 - [7] Rateb Jabbar, Moez Krichen, Noora Fetais, and Kamel Barkaoui. Adoption de techniques de vérification formelle et de test basé sur des modeles pour valider un systeme de partage de dossiers médicaux basé sur la blockchain. 2020.
 - [8] Rateb Jabbar, Moez Krichen, Mohamed Kharbeche, Noora Fetais, and Kamel Barkaoui. A formal model-based testing framework for validating an iot solution for blockchain-based vehicles communication. In *15th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering*, pages 595–602. SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2020.
 - [9] Rateb Jabbar, Moez Krichen, Mohamed Kharbeche, Noora Fetais, and Kamel Barkaoui. Un cadre de test formel pour la validation d'un système de communication inter-véhiculaire basé sur les iots et la blockchain. 2020.
 - [10] Rateb Jabbar, Mohammed Shinoy, Mohamed Kharbeche, Khalifa Al-Khalifa, Moez Krichen, and Kamel Barkaoui. Urban traffic monitoring and modeling system : An iot solution for enhancing road safety. In *2019 international conference on internet of things, embedded systems and communications (iintec)*, pages 13–18. IEEE, 2019.
 - [11] Angel Jaramillo-Alcazar, Jaime Govea, and William Villegas-Ch. Advances in the optimization of vehicular traffic in smart cities : Integration of blockchain and computer vision for sustainable mobility. *Sustainability*, 15(22) :15736, 2023.
 - [12] Abdul Rehman Javed, Muhammad Abul Hassan, Faisal Shahzad, Waqas Ahmed, Saurabh Singh, Thar Baker, and Thippa Reddy Gadekallu. Integration of blockchain technology and federated learning in vehicular (iot) networks : A comprehensive survey. *Sensors*, 22(12) :4394, 2022.
 - [13] Rui Jiang, Jiatao Li, Weifeng Bu, and Chongqing Chen. Toward sustainable model services for deep learning : A sub-network-based solution integrating blockchain with ipfs and a use case in intelligent transportation. *Sustainability*, 15(21) :15435, 2023.
 - [14] Hajra Khan, Imran Fareed Nizami, Saeed Mian Qaisar, Asad Waqar, Moez Krichen, and Abdulaziz Turki Almaktoom. Analyzing optimal battery sizing in mi-

- crogrids based on the feature selection and machine learning approaches. *Energies*, 15(21) :7865, 2022.
- [15] Moez Krichen. Adoption de la technologie blockchain pour les réseaux sans fil modernes. 2022.
- [16] Moez Krichen. Application de la technologie blockchain pour l'internet des objets. 2022.
- [17] Moez Krichen. How artificial intelligence can revolutionize software testing techniques. In *International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications*, pages 189–198. Springer Nature Switzerland Cham, 2022.
- [18] Moez Krichen. Utilisation de la technologie blockchain dans les réseaux sans fil modernes, l'iot et les réseaux électriques intelligents. 2022.
- [19] Moez Krichen. Formal methods and validation techniques for ensuring automotive systems security. *Information*, 14(12) :666, 2023.
- [20] Moez Krichen. La technologie blockchain pour les réseaux électriques intelligents. 2023.
- [21] Moez Krichen. Strengthening the security of smart contracts through the power of artificial intelligence. *Computers*, 12(5) :107, 2023.
- [22] Moez Krichen. A survey on formal verification and validation techniques for internet of things. *Applied Sciences*, 13(14) :8122, 2023.
- [23] Moez Krichen, Meryem Ammi, Alaeddine Mihoub, and Qasem Abu Al-Haija. Short survey on using blockchain technology in modern wireless networks, iot and smart grids. In *International Conference on Cybersecurity, Cybercrimes, and Smart Emerging Technologies*, pages 163–173. Springer International Publishing Cham, 2022.
- [24] Mariam Lahami, Afef Jmal Maâlej, Moez Krichen, and Mohamed Amin Hammami. A comprehensive review of testing blockchain oriented software. *ENASE*, 182 :355–62, 2022.
- [25] Tong Liu, Fariza Sabrina, Julian Jang-Jaccard, Wen Xu, and Yuanyuan Wei. Artificial intelligence-enabled ddos detection for blockchain-based smart transport systems. *Sensors*, 22(1) :32, 2021.
- [26] Elio Jordan Lopes, Shaolin Kataria, Shashank Keshav, Sumaiya Thaseen Ikram, Muhammad Rukunuddin Ghalib, Achyut Shankar, and Moez Krichen. Live video streaming service with pay-as-you-use model on ethereum blockchain and inter-planetary file system. *Wireless Networks*, 28(7) :3111–3125, 2022.
- [27] Saeed Mian Qaisar, Nehal Alyamani, Asad Waqar, and Moez Krichen. Machine learning with adaptive rate processing for power quality disturbances identification. *SN Computer Science*, 3 :1–6, 2022.
- [28] Alaeddine Mihoub, Hosni Snoun, Moez Krichen, Riadh Bel Hadj Salah, and Montassar Kahia. Predicting covid-19 spread level using socio-economic indicators and machine learning techniques. In *2020 first international conference of smart systems and emerging technologies (SMARTTECH)*, pages 128–133. IEEE, 2020.
- [29] Mazin Abed Mohammed, Abdullah Lakhan, Karrar Hameed Abdulkareem,

- Mohd Khanapi Abd Ghani, Haydar Abdulameer Marhoon, Jan Nedoma, and Radek Martinek. Multi-objectives reinforcement federated learning blockchain enabled internet of things and fog-cloud infrastructure for transport data. *Heliyon*, 9(11), 2023.
- [30] Hussam Saeed Musa, Moez Krichen, Adem Alpaslan Altun, and Meryem Ammi. Survey on blockchain-based data storage security for android mobile applications. *Sensors*, 23(21) :8749, 2023.
- [31] Ashish Sharma, Yogesh Awasthi, and Sunil Kumar. The role of blockchain, ai and iot for smart road traffic management system. In *2020 IEEE India Council International Subsections Conference (INDISCON)*, pages 289–296. IEEE, 2020.
- [32] Prashant Singh, Zeinab Elmi, Yui-yip Lau, Marta Borowska-Stefańska, Szymon Wiśniewski, and Maxim A Dulebenets. Blockchain and ai technology convergence : Applications in transportation systems. *Vehicular Communications*, page 100521, 2022.
- [33] Salah Zidi, Alaeddine Mihoub, Saeed Mian Qaisar, Moez Krichen, and Qasem Abu Al-Haija. Theft detection dataset for benchmarking and machine learning based classification in a smart grid environment. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 35(1) :13–25, 2023.