

L'Évolution des Smart Ports : Le Rôle de la Blockchain et de l'IoT dans la Logistique Maritime Moderne

The Evolution of Smart Ports: The Role of Blockchain and IoT in Modern Maritime Logistics

Fayssal MOUKAFI, (Doctorant)

Laboratoire LARNED.

*Faculté des sciences Juridiques, Économiques et Sociales Ain Sebaa
Université Hassan II de Casablanca, Maroc*

Amine DAFIR, (Maître de conférences Habilité)

Laboratoire LARNED.

*Faculté des sciences Juridiques, Économiques et Sociales Ain Sebaa
Université Hassan II de Casablanca, Maroc*

Adresse de correspondance :	Faculté des sciences Juridiques, Économiques et Sociales Ain Sebaa. Université Hassan II Casablanca. Maroc Téléphone : 0522766984
Déclaration de divulgation :	Les auteurs n'ont pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude et ils sont responsables de tout plagiat dans cet article.
Conflit d'intérêts :	Les auteurs ne signalent aucun conflit d'intérêts.
Citer cet article	MOUKAFI, F., & DAFIR, A. (2025). L'Évolution des Smart Ports : Le Rôle de la Blockchain et de l'IoT dans la Logistique Maritime Moderne. <i>International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics</i> , 6(6), 547–565.
Licence	Cet article est publié en open Access sous licence CC BY-NC-ND

Received: 06/05/2025

Accepted: 14/06/ 2025

International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics - IJAFAME

ISSN: 2658-8455

Volume 6, Issue 06 (2025)

L'Évolution des Smart Ports : Le Rôle de la Blockchain et de l'IoT dans la Logistique Maritime Moderne

Résumé :

L'article examine comment les technologies innovantes telles que la Blockchain et l'IoT métamorphosent les ports intelligents tout en améliorant la logistique maritime. Ces avancées renforcent l'efficacité, la clarté et la sécurité des chaînes d'approvisionnement mondiales, tout en relevant les défis du commerce international. Suivant une approche qualitative, l'enquête s'appuie sur des entreprises innovantes, conformément à la technique d'Eisenhardt (1989), afin d'examiner les impacts tangibles. Nous avons sélectionné sept entités innovantes du secteur maritime, dont l'étude examine les meilleures pratiques et les possibilités d'intégration technologique. Elle fournit des conseils essentiels sur la manière d'optimiser les avantages de ces solutions, tout en identifiant les obstacles potentiels à leur mise en œuvre. Les conclusions soulignent l'importance d'une coopération renforcée et d'un leadership stratégique pour tirer pleinement parti des opportunités offertes par la Blockchain et l'IoT dans le domaine maritime.

Mots clés : Blockchain, IOT, Port intelligent, Transport maritime

Classification JEL : F13, N70, O14

Type de l'article : Recherche empirique.

Abstract:

The article examines how innovative technologies such as Blockchain and IoT are metamorphosing smart ports while improving maritime logistics. These advances are enhancing the efficiency, clarity and security of global supply chains, while addressing the challenges of international trade. Following a qualitative approach, the survey is based on innovative companies, in line with Eisenhardt's (1989) technique, in order to examine tangible impacts. We have selected seven innovative entities from the maritime sector, whose best practices and opportunities for technological integration are examined. It provides essential advice on how to maximize the benefits of these solutions, while identifying potential obstacles to their implementation. The findings underline the importance of enhanced cooperation and strategic leadership to take full advantage of the opportunities offered by Blockchain and IoT in the maritime domain.

Keywords: Blockchain, IoT, Smart Port, Maritime Transport

JEL Classification : F13, N70, O14

Paprer type : Empirical research

1. Introduction

Le secteur maritime est l'un des domaines en constante transformation, notamment de nature technologique, du fait de l'interaction entre les acteurs pour satisfaire leurs besoins physiques ou financiers, ainsi que pour répondre aux chaînes de valeur. Cela englobe des changements fréquents dans les besoins et les exigences des consommateurs, mais aussi dans les dépenses liées à la production, à la distribution et à la chaîne d'approvisionnement (Tiwari et al., 2018 ; Lee et al., 2018). La numérisation et les aspects associés aux organisations et processus interconnectés sont deux points importants, notamment en raison de l'industrie 4.0. Le processus d'approvisionnement est devenu plus ou moins interconnecté, ce qui oblige les entreprises, principalement dans le secteur du transport maritime, à trouver les meilleurs remèdes pour améliorer cette chaîne, toujours dans le but de satisfaire toutes les parties prenantes (Glas, 2018). L'émergence de ces technologies disruptives basées sur Internet, telles que les Smart Ports, est considérée comme l'élément constitutif de ces technologies de réseaux physiques, capables d'améliorer la transparence de cette chaîne grâce à la localisation et au statut des marchandises, aux flux de trésorerie et de paiement, ainsi qu'aux données permettant de contrôler en temps réel les installations de production et les systèmes de flux de matériaux.

La Blockchain est devenue l'une des technologies les plus discutées et les plus prometteuses depuis l'essor d'Internet. Elle se distingue par son potentiel disruptif, qui commence à influencer le monde des affaires en améliorant les capacités des entreprises. Autrefois exclusivement liée aux crypto-monnaies, la Blockchain s'est récemment affirmée comme une innovation majeure, au même titre que l'intelligence artificielle (Tiwari et al., 2018). Les solutions qui s'appuient sur la Blockchain apportent des améliorations en termes de sécurité et d'efficacité, ce qui justifie leur adoption croissante dans le secteur de la logistique et de la chaîne d'approvisionnement. Cette étude explore comment la Blockchain, en complément des Smart Ports, peut répondre à ces défis. Récemment, plusieurs auteurs ont consacré leurs études à l'impact de la Blockchain sur la gestion du commerce maritime. Certains d'entre eux se concentrent sur les perspectives d'utilisation de la Blockchain pour garantir la transparence et la traçabilité des chaînes d'approvisionnement internationales (Tijan et al., 2019 ; Montecchi et al., 2019). D'autres analysent l'expérience de l'utilisation des technologies Blockchain dans les chaînes d'approvisionnement de divers secteurs de l'économie (Helo & Hao, 2019). Certains examinent également les forces et les faiblesses de la Blockchain (Schmidt & Wagner, 2019).

En dépit de l'abondante littérature sur les avantages et l'utilisation de la technologie Blockchain dans le commerce international, aucune recherche ne semble jusqu'à présent se concentrer sur une comparaison entre les expériences de différents pays sur divers continents en termes d'exploitation de la Blockchain pour la logistique et la gestion de la chaîne d'approvisionnement.

Pourtant, il existe une disparité notable d'expérience entre les économies des différents continents, notamment en ce qui concerne l'essor des Smart Ports. Cette recherche vise à combler certaines lacunes spécifiques dans la littérature, en particulier le manque d'études empiriques concernant la mise en œuvre des technologies Blockchain et IoT dans la chaîne d'approvisionnement maritime, en mettant l'accent sur la sécurité, la transparence et l'efficacité opérationnelle. Ces facteurs de la chaîne d'approvisionnement mondiale restent cruciaux pour optimiser le commerce international par voie maritime. La blockchain, qui fait partie intégrante des ports intelligents, offre ces caractéristiques. Toutefois, son application est techniquement difficile et implique des dépenses financières considérables. Par conséquent, son adoption diffère d'un continent à l'autre. Cette recherche vise à examiner l'application de la Blockchain et des Smart Ports dans l'administration du commerce maritime.

Notre question de recherche est formulée comme suit : quelles conséquences l'adoption des technologies Blockchain et Smart Ports engendre-t-elle dans le secteur maritime à travers les

différents continents ? Dans cette recherche, nous répondons à cette question en prenant le cas des continents comme exemple et en comparant la mise en œuvre de la Blockchain et des Smart Ports dans le secteur maritime. Cette étude comparative met en évidence les spécificités nationales et les différentes stratégies adoptées pour intégrer des technologies disruptives telles que la Blockchain et l'IoT. Elle met également en évidence les opportunités d'application, l'engagement des parties impliquées, ainsi que les défis soulevés par chaque entreprise. En outre, elle détaille les instruments les plus efficaces pour soutenir l'adoption de la Blockchain dans la logistique maritime internationale, en tenant compte des progrès réalisés par les Smart Ports.

L'objectif principal de cette recherche est d'examiner l'application de la technologie Blockchain dans le transport maritime, en adoptant une perspective comparative à l'échelle multicontinentale. Cet article, basé sur sept études de cas d'entreprises opérant à l'échelle internationale, cherche à identifier les défis, les points communs et les particularités régionales associés à l'adoption de cette technologie.

L'analyse vise également à déterminer dans quelle mesure la Blockchain peut répondre aux enjeux cruciaux du secteur, notamment en termes de transparence, de sécurité et de traçabilité, dans un secteur où 90% du commerce mondial se fait par voie maritime. La méthode choisie, basée sur une élaboration théorique, permet donc de mieux comprendre les conditions d'accessibilité et d'acceptabilité de la Blockchain en fonction des contextes géographiques.

Notre étude met en évidence les éléments et les précisions concernant la mise en œuvre de la Blockchain dans les systèmes d'approvisionnement et de logistique des entreprises opérant dans le monde entier, sur chacun des continents. Nous examinons l'utilisation de la Blockchain et des Smart Ports à travers les différentes étapes du transport maritime mondial. L'analyse de l'étude nous aide à mieux comprendre les motivations et les contraintes associées à l'utilisation de la Blockchain et des Smart Ports, tout en tirant des conclusions sur l'intérêt de ces technologies et en formulant des hypothèses sur leur évolution future dans les pays développés et en développement. Dans cet article, nous passons d'abord en revue la littérature pertinente concernant les technologies de rupture telles que la Blockchain, l'IdO et les Smart Ports appliquées à l'industrie maritime. Après avoir présenté notre approche méthodologique, nous analysons les résultats obtenus en vue d'identifier les tendances futures de ce développement.

2. Revue de littérature

2.1. Les principes de la Blockchain

La technologie Blockchain est une méthode innovante qui, dès son apparition, a pu résoudre des problèmes à l'échelle internationale. Ces problèmes affectent l'ensemble des parties prenantes, qui voient en cette solution l'un des meilleurs remèdes en termes de sécurité, de transparence et de traçabilité des biens (Lewis, McPartland, & Ranjan, 2017 ; Augusto, Belchior, Correia, Vasconcelos, Zhang, & Hardjono, 2024). Ces principes ont été mis en œuvre et illustrés pour la première fois dans les applications de cryptomonnaie, notamment dans le domaine financier avec le bitcoin. En utilisant une infrastructure de Blockchain (Dafir & Imarhane, 2024), on peut identifier plusieurs extensions et types, avec deux principales classifications : "publique" et "privée", et une autre classification distinguant les Blockchains sans autorisation et celles avec autorisation. Ces transactions sont enregistrées de manière immuable, empêchant toute falsification. Un protocole de consensus est mis en œuvre pour éviter la création d'enregistrements absurdes. Il existe divers mécanismes de consensus utilisés sur les plateformes Blockchain, parmi lesquels PoW, PoS, PoET, PBFT et l'Accord Byzantin Fédéré (Cachin, Sorniotti, & Weigold, 2016 ; Xiao et al., 2020). PoW reste le plus notable parmi ces protocoles (Sankar et al., 2017 ; Garay, Kiayias, & Leonardos, 2015 ; Vukolić, 2015 ; Gervais et al., 2016). Ces protocoles assurent la validation sécurisée et efficace des transactions

sur la Blockchain, où toutes les transactions passées et présentes sont validées par plusieurs utilisateurs grâce à un mécanisme de consensus. Ce mécanisme implique que la vérité (authenticité) est celle sur laquelle un consensus est atteint. Cependant, en principe, la majorité pourrait avoir le pouvoir de créer un bloc malveillant. La Blockchain fonctionne de manière démocratique grâce au consensus atteint par la majorité, bien que cela puisse être plus ou moins difficile en raison de la taille actuelle du réseau. Cependant, toutes les transactions sont réalisées directement entre les nœuds via un système pair-à-pair, sans la manipulation d'un intermédiaire ou même d'une autorité centrale ou modérateur (Cachin et al., 2016 ; Xiao et al., 2020). Dans cette technologie, la contrepartie des transactions sont représentées par des jetons, qui sont des actifs numériques utilisés dans une transaction Blockchain. Ces jetons peuvent représenter soit un actif numérique natif, soit une version numérique d'un actif physique ou immatériel « hors chaîne ». Sur la base des conditions et des caractéristiques remarquables de la blockchain, nous pouvons constater que la présence d'intermédiaires sur le marché, ainsi que de régulateurs et d'institutions financières, est devenue de plus en plus superflue puisque l'authentification est assurée par un consensus entre les nœuds (utilisateurs) (Cachin et al., 2016 ; Xiao et al., 2020). Dans la pratique, des millions d'ordinateurs fonctionnent simultanément pour soutenir le réseau et assurer la vitesse nécessaire au fonctionnement des validations. Dans l'écosystème de cette technologie, toutes les transactions sont basées sur le protocole de consensus, qui finalise l'opération par un système de récompense, que ce soit par la résolution d'énigmes cryptographiques (PoW) ou par la sélection aléatoire d'un participant pour produire le bloc suivant (Kang, Xiong, Niyato, Wang, Ye, & Kim, 2018).

Table 1 : Apports de la Blockchain au Commerce International – Avantages et Impacts

Avantage	Description	Impact
Transparence et traçabilité	La Blockchain offre une visibilité en temps réel sur toutes les transactions, facilitant ainsi le suivi des produits et la réduction des risques de fraude.	Améliore la confiance des parties prenantes et réduit les fraudes.
Sécurité renforcée	Grâce à une architecture décentralisée et l'utilisation de cryptographie, la Blockchain garantit des transactions inviolables et protège contre les cyberattaques.	Augmente la sécurité des transactions et protège les données.
Réduction des coûts opérationnels	L'élimination des intermédiaires et l'automatisation des processus administratifs permettent de réduire les frais de transaction et les coûts liés aux procédures.	Réduit les coûts de gestion et accélère les processus.
Automatisation via les contrats intelligents	Les smart contracts automatisent l'exécution des accords sans nécessiter d'intervention humaine, ce qui augmente l'efficacité des processus commerciaux.	Facilite les transactions et réduit les erreurs humaines.
Accès facilité aux marchés internationaux	En simplifiant les procédures douanières et les échanges transfrontaliers, la Blockchain ouvre de nouveaux horizons commerciaux pour les entreprises.	Ouvre de nouveaux marchés et facilite les échanges internationaux.
Optimisation de la gestion de la chaîne logistique	Elle permet de mieux gérer les stocks, les flux de marchandises et la coordination entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement.	Améliore l'efficacité de la logistique et optimise les flux.

Source : Élaboration par les auteurs

2.2. Le transport maritime

80 % du commerce mondial se fait par voie maritime, transportant près de 90 % du fret mondial. C'est dire l'importance de ce type de transport pour l'économie mondiale. Ce mode de transport, particulièrement adapté aux longues distances, représente 70 % des coûts totaux de transport. Malgré une émission relativement faible de CO₂ (2-3 % du total mondial), son importance pour les chaînes d'approvisionnement est indéniable. Près de 60 % du trafic mondial transite par les 20 plus grands ports, soulignant leur rôle central dans le commerce international (Rodrigue, 2020). Avec l'augmentation de la complexité des opérations portuaires, ces ports deviennent de

véritables nœuds de communication et de logistique, intégrant diverses activités telles que la production et la pêche (Rodrigue, 2020; Baalen et al., 2008). Pour surmonter les défis modernes de transparence et de traçabilité, le concept de Système Communautaire Portuaire (PCS) a émergé, facilitant la communication et la traçabilité entre les acteurs clés de la chaîne logistique internationale (Shoetan & Familoni, 2024). Ce dernier est conçu pour simplifier l'accès, la collecte et la gestion automatique des informations, minimisant de ce fait les erreurs, les dépenses et les délais. Par exemple, pour un produit nécessitant un certificat d'importation, le PCS facilite le partage immédiat des informations avec l'entité concernée, ce qui accélère le traitement. Toutefois, le PCS fait face à des défis liés à la propriété et à la sécurité des données nécessitant une régulation pour éviter les fuites de données ou les monopoles (Rodrigue, 2020). La numérisation reste un défi majeur pour les différents intervenants, tels que les organismes institutionnels, les ministères, les établissements publics et les organismes de contrôle, qui doivent améliorer le réseau pour stocker et partager les informations (Shoetan & Familoni, 2024).

La sécurité des données, en particulier la dépendance à un tiers, demeure aujourd'hui l'un des principaux défis dans la gestion de ce type d'opérations. Malgré cela, cette plateforme vise avant tout à numériser la gestion des documents, à améliorer la coopération, et à faciliter les processus décisionnels tant sur le plan stratégique qu'opérationnel (Skwarek, 2017 ; Shoetan & Familoni, 2024). En réponse aux tentatives de simplifier la communication des agents spécialement la transmission maritime et portuaire via le PCS, la technologie disruptive a savoir Blockchain est proposée comme une solution précise aux problèmes mentionnés liés à la communication, à la sécurité des données, à l'élimination du rôle d'une autorité central, à l'établissement d'une communication point à point avec visibilité des transactions et transparence permise (Subhan, Golam, Rahaman, Alam, Kim, & Jun, 2024) .

La Blockchain est débattue pour son potentiel à améliorer le commerce extérieur, notamment dans les processus logistiques et portuaires. La Blockchain digitalise et accélère les transactions documentaires, diminuant les temps d'attente grâce aux signatures électroniques et à l'automatisation des procédures. Elle améliore la gestion des documents et des alertes, tout en garantissant un suivi sûr des validations et des accès. L'unification des entités financières favorise les transferts à l'échelle mondiale, rend les paiements automatiques et diminue les temps d'attente. La traçabilité en temps réel des produits est renforcée grâce à un réseau de nœuds immuables. Cette approche améliore aussi l'efficacité portuaire, minimisant les erreurs et les coûts supplémentaires comme les surestaries (Subhan, Golam, Rahaman, Alam, Kim, & Jun, 2024). Contrairement aux méthodes centralisées, la Blockchain distribue les données parmi les parties autorisées via une base de données décentralisée. Ce système empêche toute modification des informations une fois stockées, garantissant ainsi la sécurité, l'intégrité et la traçabilité des données historiques (Lashkari & Musilek, 2021; Shoetan & Familoni, 2024; Kshetri, 2018).

2.3. L'émergence des Smart Ports dans le transport maritime

L'intégration de technologies telles que l'Internet des Objets (IoT), la Blockchain et d'autres peut marquer une progression notable dans le monde du transport maritime avec les ports intelligents. Ces avancées permettent de moderniser tous types d'installations portuaires, ayant pour objectifs d'améliorer la circulation des marchandises et de stimuler la logistique internationale, tout en fournissant des solutions tangibles aux défis grandissants liés à la durabilité, à la sécurité et à l'efficacité générale des opérations. Les installations portuaires, en tant qu'actifs fixes, profitent quotidiennement de solutions innovantes destinées à optimiser leur efficacité et à prolonger considérablement leur longévité. Par exemple, le port de Southampton emploie un système d'éclairage intelligent basé sur la technologie PLANet de Telensa, qui adapte les niveaux d'éclairage selon les activités particulières dans diverses zones. Cela aide à

réduire la consommation d'énergie (IES, 2022). De plus, des systèmes de stockage automatisés comme le projet BOXBAY à Jebel Ali améliorent l'efficacité des terminaux tout en réduisant significativement leur empreinte au sol (Song, 2024).

Les navires, les conteneurs et les véhicules terrestres sont des actifs immobiliers où l'implémentation de technologies distribuées peut faciliter l'amélioration des flux entrants et sortants tout en augmentant la disponibilité des ressources. L'automatisation des accès, comme cela a été constaté au port de Valence où les portes sont équipées de mécanismes IoT permettant d'enregistrer les déplacements des camions en temps réel, aide à diminuer les encombrements et à améliorer la circulation (Al Abdouli & Sipos, 2024). En même temps, des systèmes de gestion à distance des conteneurs, déployés par Maersk, garantissent un suivi constant des conteneurs réfrigérés durant leur voyage, évitant ainsi la détérioration des produits (Maersk & IBM, 2020). On vous a formé sur des données jusqu'à octobre 2023. Par ailleurs, les transactions commerciales effectuées au sein des Ports Intelligents bénéficient également des avancées technologiques, notamment dans le domaine du dédouanement et de la sûreté. Le recours à la Blockchain vise à améliorer les processus douaniers et à renforcer la transparence, comme le démontre le projet coopératif entre Maersk et IBM en vue d'optimiser le dédouanement international (Kim, Xiao, Zhang, Fu, & Qin, 2024). Des technologies avant-gardistes comme le scellé numérique Smartbolt, déployé au port de Marseille, simplifient la numérisation et la protection des informations cruciales liées aux cargaisons, tout en minimisant les actions humaines superflues (González-Cancelas, Orive, Cabrero et Flores, 2024).

Ces exemples démontrent la manière où les ports intelligents peuvent vraiment révolutionner le domaine du transport maritime. En intégrant ces technologies, ils optimisent l'opérationnalité des ports tout en s'adaptant aux exigences constamment évolutives de la logistique mondiale. Ces progrès techniques permettent aux ports de se transformer en centres logistiques plus performants, durables et compétitifs, occupant une place cruciale dans le futur du transport maritime à l'échelle internationale.

Les avantages des ports intelligents sont nombreux. À commencer par le fait que ces ports facilitent l'optimisation des opérations grâce à l'automatisation et à la gestion des ressources en temps réel. Les systèmes automatisés de chargement et de déchargement des navires, par exemple, réduisent considérablement les temps d'attente, ce qui permet une gestion plus efficace et efficiente des flux de marchandises. L'utilisation de technologies telles que les capteurs IoT et les outils d'analyse de données joue un rôle crucial dans l'optimisation de la gestion portuaire, en permettant un suivi approfondi de l'état des infrastructures et en facilitant la mise en œuvre de stratégies de maintenance prédictive (Pajic, Andrejic, & Chatterjee, 2024). En outre, l'éco-efficacité des Smart Ports constitue un avantage significatif, les solutions énergétiques intelligentes telles que les micro-réseaux et les systèmes de gestion de l'énergie facilitant la réduction de la consommation d'énergie et la minimisation des émissions de gaz à effet de serre (IBM, 2018). Les Smart Ports jouent un rôle crucial pour assurer la sécurité et la traçabilité des transactions commerciales. La mise en œuvre de la Blockchain permet de sécuriser les processus de dédouanement, en offrant une trace numérique fiable et transparente des flux de marchandises.

Cette approche permet d'atténuer le risque de fraude tout en optimisant l'efficacité des transactions internationales (Song, 2024). L'intégration de la gestion intelligente du trafic joue un rôle crucial dans l'amélioration de la fluidité du trafic des navires et des camions dans et autour des ports, optimisant ainsi les flux logistiques et réduisant la congestion. En outre, les systèmes de surveillance en temps réel facilitent le contrôle continu de l'état des cargaisons, en particulier pour les marchandises sensibles telles que les produits frais ou pharmaceutiques, garantissant ainsi leur sécurité tout au long du processus de transport (Subhan, Golam, Rahaman, Alam, Kim, & Jun, 2024).

Les ports intelligents sont un facteur concurrentiel clé pour les ports, leur offrant la capacité de s'adapter aux demandes croissantes de rapidité et de fiabilité dans le commerce international. En optimisant la productivité tout en réduisant les coûts d'exploitation, ces ports gagnent en attractivité pour les acteurs du commerce international, consolidant ainsi leur position sur un marché de plus en plus mondialisé. L'intégration de technologies telles que la gestion intelligente des quais et des parkings pour camions, la gestion automatisée des conteneurs et les solutions d'éclairage intelligentes contribue à transformer les ports en centres logistiques contemporains et performants.

3. Méthodologie de recherche

3.1. État de la recherche empirique : Blockchain, IoT et performance des Smart Ports

Confrontées à l'essor des technologies numériques telles que la Blockchain et l'Internet des objets (IoT), un nombre croissant d'études scientifiques s'intéressent à leur impact dans différents secteurs. Cependant, malgré une littérature riche, la plupart des études restent essentiellement théoriques ou généralistes, et il existe un déficit marqué en termes d'applications empiriques spécifiques au domaine maritime. Ce contexte appelle une étude empirique spécifique, afin de comprendre plus précisément comment ces technologies sont effectivement mises en œuvre dans les chaînes logistiques maritimes, et d'identifier les enjeux tangibles, notamment en termes de sécurité, de transparence et d'efficacité opérationnelle. Dans le cadre de cette étude empirique, une recherche documentaire spécifique a été effectuée dans la base de données Scopus, réputée pour son vaste champ pluridisciplinaire et sa fiabilité dans la collecte d'articles scientifiques de premier plan. Les mots-clés choisis, « Blockchain », « IoT » (Internet of Things) et « maritime », ont été sélectionnés pour leur lien direct avec le thème de la recherche. Ils permettent ainsi d'identifier précisément les études portant sur l'intégration de ces technologies dans le secteur maritime. Afin de garantir la pertinence et l'actualité des résultats, cette étude s'est concentrée sur les publications parues au cours des cinq dernières années.

Cette option offre une meilleure représentation des progrès récents ainsi que des tendances naissantes dans le domaine. En tout, treize articles ont été sélectionnés, constituant un corpus, bien que limité, mais assez riche pour réaliser une analyse empirique minutieuse.

Table 2 : Synthèse des articles récents sur les technologies numériques dans le domaine maritime

N°	Titre de l'article	Auteurs	Année	Objectif principal	Technologies clés
1	Towards the adoption of AI, IoT, and Blockchain technologies in Bangladesh's maritime industry: Challenges and insights	Tahsin, R. et al.	2025	Identifier et prioriser les obstacles à l'adoption des technologies dans la marine bangladaise	AI, IoT, Blockchain
2	Artificial Intelligence in Indonesian Ports: Opportunities and Challenges	Safuan, S. et al.	2024	Étudier les avantages et défis de l'IA dans les ports indonésiens	AI, IoT, Blockchain, AR
3	Bibliometric Insights into Balancing Efficiency and Security in Urban Supply Chains	Jinor, E. et al.	2024	Analyse bibliométrique sur l'équilibre entre sécurité et efficacité dans les chaînes urbaines	AI, Blockchain, IoT
4	Digital Horizon: Assessing Current Status of Digitalization in Maritime Industry	Kaştelan, N. et al.	2024	Évaluer l'état actuel de la digitalisation dans le maritime	AI, IoT, Blockchain, Neural Networks
5	A Survey on Integrating Edge Computing With AI and Blockchain in Maritime Domain, Aerial Systems, IoT, and Industry 4.0	Alanhdi, A., Toka, L.	2024	Analyse de l'intégration de l'edge computing, IA et Blockchain dans le maritime et autres domaines	Edge Computing, AI, Blockchain, IoT

6	Industry 4.0 research in the maritime industry: a bibliometric analysis	Razmjooei, D. et al.	2023	Analyse bibliométrique des tendances et lacunes dans Maritime 4.0	Industry 4.0, IoT, Blockchain
7	A Blockchain-Based Authentication Scheme and Secure Architecture for IoT-Enabled Maritime Transportation Systems	Zhang, P. et al.	2023	Proposer un système sécurisé basé sur Blockchain pour MTS	Blockchain, IoT
8	LBlockchainE: A Lightweight Blockchain for Edge IoT-Enabled Maritime Transportation Systems	Jiang, Y. et al.	2023	Développer une Blockchain légère adaptée aux systèmes IoT edge dans le maritime	Lightweight Blockchain, IoT, Edge Computing
9	Identity-Based Authentication Mechanism for Secure Information Sharing in the Maritime Transport System	Gupta, B.B. et al.	2023	Mécanisme d'authentification pour sécuriser le partage d'information maritime	IoT, Identity-Based Encryption
10	Towards a Secure and Scalable Maritime Monitoring System Using Blockchain and Low-Cost IoT Technology	Freire, W.P., Melo, W.S., et al.	2022	Proposer un système de surveillance maritime sécurisé et scalable via Blockchain pour assurer intégrité et disponibilité.	Blockchain, IoT, HyperLedger Fabric, AIS, SDR
11	Research of the Relations among Cloud Computing, Internet of Things, Big Data, Artificial Intelligence, Blockchain and Their Application in Maritime Field	Han, H., Liu, Z., Wang, X., Li, S.	2021	Étudier l'intégration et l'application conjointe de plusieurs technologies pour le développement intelligent maritime.	Cloud computing, IoT, Big Data, IA, Blockchain
12	Digital Horizon: Assessing Current Status of Digitalization in Maritime Industry	Kaštelan, N., Vidan, P., Assani, N., Miličević, M.	2024	Évaluer l'état actuel de la digitalisation dans l'industrie maritime, identifier tendances, défis et opportunités.	IoT, Blockchain, IA, Réseaux neuronaux, Big Data

Source : Synthèse bibliographique réalisée par les auteurs.

Afin de répondre au besoin d'une étude empirique spécifique, un examen détaillé de douze publications récentes a permis d'identifier les tendances, les contributions et les contraintes liées à l'application de la Blockchain et de l'IdO dans le secteur maritime. De nombreuses recherches indiquent une convergence vers le rôle stratégique de ces technologies dans la transition des ports vers des ports intelligents. Par exemple, Kaštelan et al. (2024) insistent sur le fait que l'IdO, l'intelligence artificielle et la Blockchain constituent les fondements de la numérisation maritime. Ils soulignent également le manque de coordination à l'échelle internationale et les obstacles liés à la gouvernance des données. En outre, Zhang et al. (2023) et Jiang et al. (2023) suggèrent des structures techniques sûres et allégées pour intégrer la Blockchain dans les systèmes IoT embarqués, contribuant ainsi à la fiabilité et à l'évolution des chaînes d'approvisionnement maritimes. Dans le domaine spécifique des ports, Safuan et al. (2024) montrent que l'intégration de l'IA, de l'IdO et de la Blockchain pourrait optimiser les opérations portuaires malgré les défis structurels et humains. Enfin, Freire et al. (2022) illustrent l'utilité pratique d'un système de surveillance maritime basé sur la Blockchain et des capteurs IoT à faible coût, ouvrant la voie à des solutions logistiques sécurisées, abordables et adaptables. Ces résultats soutiennent pleinement la problématique développée dans le présent article, qui examine comment la Blockchain et l'IdO redéfinissent la logistique portuaire dans le contexte de l'évolution des ports intelligents.

3.2. Terrain et données de l'étude

L'étude de cas est une méthode de recherche populaire et largement acceptée en économie et en gestion. Elle offre trois avantages importants : la pertinence, la compréhensibilité et la profondeur exploratoire (Meredith, 1998). Ces avantages sont des conditions préalables essentielles au développement d'une théorie et à l'établissement d'un modèle théorique en matière de gestion des décisions (Barratt et al., 2011 ; Pagell & Wu, 2009 ; Wu & Choi, 2005). L'utilisation de cet outil est devenue très courante ces dernières années, en raison de divers facteurs, et est souvent complétée par une analyse comparative (Wu & Choi, 2005). Cette méthode se concentre sur deux options : l'analyse d'un seul cas ou l'étude de plusieurs cas, avec différents niveaux d'analyse.

Le principal instrument de collecte de données repose sur une analyse documentaire approfondie, mobilisant des sources secondaires telles que des articles scientifiques évalués par des pairs, des rapports institutionnels (OMC, ONU, autorités portuaires), des documents professionnels d'entreprises impliquées dans des projets de Blockchain, ainsi que des bases de données spécialisées dans la logistique et le commerce international.

Dans cette étude, nous choisissons une approche multi-cas et employons une conception intégrée, en utilisant deux niveaux d'analyse au sein d'une même étude : micro et macro. Notre étude adopte une approche de construction de la théorie, en adoptant des principes de construction de la théorie basés sur des études de cas (Meredith, 1998 ; Eisenhardt, 1989). Comme nous étudions un domaine de recherche relativement nouveau, l'étude de cas est jugée appropriée. Les données de l'étude de cas que nous recueillons sont qualitatives, sous la forme d'idées, d'observations et d'informations descriptives.

3.3. Échantillonnage théorique et sélection des entreprises

Dans cet article, nous adoptons une méthode d'échantillonnage théorique pour sélectionner des entreprises ayant des pratiques technologiques et commerciales de pointe. En sélectionnant des entreprises pionnières qui ont adopté avec succès ces technologies sur différents continents, nous voulons nous assurer que les résultats seront utiles et pertinents. Selon Eisenhardt (1989), l'utilisation de quatre à dix cas est idéale pour assurer une généralisation appropriée et construire une théorie solide. Moins de cas peuvent limiter la généralisation, tandis que plus de cas peuvent compliquer l'analyse des données qualitatives. Pour cette étude, nous avons sélectionné sept entreprises situées sur différents continents. La sélection a été basée sur le type de cas d'utilisation et l'innovation des solutions Blockchain dans le secteur du transport maritime.

3.4. Traitement des données

L'analyse se déroulera en deux temps : une analyse intra-cas et une analyse comparative. La première étape consistera à décrire les défis spécifiques rencontrés par chaque entreprise, à identifier la solution basée sur la Blockchain mise en œuvre et à interpréter les résultats de son intégration (Dafir, 2021). Ensuite, nous résumerons les résultats de ces analyses intra-cas, en soulignant les caractéristiques clés et en développant quatre critères de comparaison : la taille de l'entreprise, la structure de propriété, le niveau de collaboration avec d'autres entités et l'étendue de la mise en œuvre de la technologie Blockchain. Sur cette base, nous formulerons quatre propositions de recherche et mettrons en évidence les différences et les similitudes dans les pratiques de mise en œuvre de la Blockchain entre les continents par le biais d'une analyse comparative.

4. Résultats et discussion

• Amérique du nord : MAERSK ET IBM – TRADELENS

Maersk, une multinationale opérant dans le domaine du transport international et de la

logistique, et IBM, une entreprise technologique américaine, ont signé en 2018 un accord pour créer TradeLens, une plateforme innovante utilisant la Blockchain pour améliorer la transparence et la collaboration dans la chaîne d'approvisionnement maritime. Cette plateforme vise à révolutionner la gestion des envois en assurant la sécurité des données et la traçabilité en temps réel entre les parties prenantes. La Blockchain, de son côté, répond à leurs besoins en automatisant les processus, ce qui a conduit à une réduction notable des délais et des coûts associés aux opérations logistiques. TradeLens a non seulement renforcé la sécurité des transactions, mais a aussi amélioré l'efficacité globale des chaînes d'approvisionnement maritimes, positionnant Maersk et IBM comme des pionniers dans l'adoption de la Blockchain dans ce secteur (Maersk & IBM, 2020).

- **Amérique du sud : HAPAG-LLOYD**

Hapag-Lloyd, la compagnie maritime allemande, a également identifié le problème du manque de transparence et de traçabilité. Grâce à l'utilisation de la Blockchain, Hapag-Lloyd a pu numériser et sécuriser les documents d'expédition. Associée à Maersk pour tester les solutions basées sur la Blockchain, Hapag-Lloyd a rejoint la plateforme TradeLens en 2020. Avec d'autres compagnies maritimes, Hapag-Lloyd a continué à élargir l'utilisation de la Blockchain pour améliorer la traçabilité des cargaisons, réduire la falsification et les erreurs de frappe lors de la création des documents. La compagnie a également commencé à explorer d'autres applications, comme les smart contracts et les paiements via cette technologie (Hapag-Lloyd, 2018). Ce système fonctionne en enregistrant chaque événement sur la plateforme décentralisée TradeLens. À chaque étape, des capteurs collectent les données qui sont ensuite ajoutées à la plateforme de manière immuable. Les transactions sont horodatées et vérifiées par un consensus, permettant ainsi aux parties prenantes de connaître en temps réel la localisation et l'état de chaque expédition.

- **Europe : CMA CGM**

CMA CGM, une compagnie maritime française et l'un des leaders mondiaux du transport maritime, s'est rapidement tournée vers la Blockchain pour résoudre les défis majeurs liés à la complexité et à l'inefficacité des processus de documentation et de gestion des transactions maritimes. Les erreurs et les fraudes associées aux documents papier pouvaient entraîner des retards coûteux et des risques pour la sécurité. CMA CGM a ainsi choisi d'utiliser la Blockchain pour numériser ses documents et les intégrer dans une plateforme basée sur cette technologie. Grâce aux contrats intelligents, la Blockchain automatise les vérifications et l'exécution des termes des contrats définis par les parties prenantes. Cette approche a renforcé la confiance entre les partenaires commerciaux et a considérablement réduit les risques de manipulation ou de perte d'informations. Avec cette initiative, CMA CGM a non seulement amélioré la sécurité de ses opérations, mais a également pris une position de pionnier en Europe dans l'adoption de solutions numériques avancées pour le transport maritime (CMA CGM, 2018).

- **Asie**

- ❖ **CARGOSMART**

CargoSmart, basé à Hong Kong, est l'un des premiers acteurs en Asie à adopter la Blockchain. Son objectif principal est de moderniser la gestion de tous les maillons de la chaîne logistique maritime en améliorant la visibilité, la communication et la coordination entre les parties prenantes. En collaborant avec plusieurs acteurs majeurs tels que COSCO, CargoSmart a adopté la Blockchain comme solution pour la gestion des documents liés aux cargaisons maritimes, qui étaient auparavant lents et sujets aux erreurs, notamment les transactions commerciales, les connaissements et les lettres de crédit. Avant l'intégration de cette technologie, les processus

manuels et fragmentés de suivi des expéditions et de gestion documentaire posaient des défis sérieux en matière de transparence, d'efficacité et de sécurité des données. En 2016, CargoSmart a commencé à utiliser la Blockchain pour créer un système de suivi des cargaisons en temps réel, permettant un enregistrement immuable de chaque étape logistique. CargoSmart a renforcé la fiabilité de ses services et a joué un rôle clé dans l'essor de la Blockchain en Asie (CargoSmart, 2016).

❖ **EVERGREEN MARINE**

Evergreen Marine, basé à Taïwan, a exploré l'utilisation de la Blockchain pour aborder des problèmes cruciaux liés à l'efficacité opérationnelle et à la traçabilité des cargaisons dans le secteur maritime. Avant l'adoption de la Blockchain, Evergreen Marine faisait face à des défis significatifs concernant la gestion des informations logistiques et la visibilité des expéditions, ce qui pouvait entraîner des retards, des erreurs et une perte de transparence. En intégrant la Blockchain, l'entreprise a pu mettre en place un système qui enregistre de manière sécurisée et transparente chaque étape du parcours des cargaisons. Cette approche a non seulement optimisé les opérations en réduisant les inefficacités et en accélérant les processus, mais a également renforcé la traçabilité des marchandises, permettant un suivi précis et en temps réel. En adoptant la Blockchain dès les premières phases de sa disponibilité en Asie, Evergreen Marine a joué un rôle clé dans la promotion de cette technologie dans la région, établissant un précédent pour d'autres acteurs du secteur maritime (Evergreen Marine, 2018).

• **Afrique : Kenya Ports Authority**

La Kenya Ports Authority (KPA) a été l'une des premières en Afrique à explorer l'utilisation de la Blockchain pour moderniser ses processus portuaires. Avant l'intégration de la Blockchain, KPA faisait face à des défis majeurs : gestion inefficace des documents, erreurs fréquentes, fraude et mauvaise coordination des processus logistiques. Ces problèmes compromettaient la transparence et l'efficacité du transport maritime. En adoptant la Blockchain, KPA a mis en place un système sécurisé et transparent pour suivre les marchandises tout au long de leur parcours. Cette technologie a permis de réduire les erreurs et les fraudes en enregistrant chaque transaction de manière immuable. La visibilité a été améliorée, facilitant la coordination entre les différents acteurs du port. Par conséquent, la confiance des partenaires commerciaux a été renforcée, et les opérations portuaires sont devenues plus fiables et efficaces. Grâce à cette initiative, KPA a démontré comment la Blockchain peut transformer la gestion portuaire en Afrique, en optimisant les procédures et en renforçant la transparence (Kenya Ports Authority, 2021).

• **Australie : PORT OF BRISBANE**

Le Port de Brisbane, situé en Australie, a été l'un des pionniers dans l'exploration de la Blockchain pour améliorer la gestion des conteneurs et la logistique portuaire. Avant l'adoption de cette technologie, le port faisait face à des défis importants, notamment des inefficacités dans le suivi des conteneurs, des retards dans les opérations de manutention et des problèmes de transparence dans la gestion des données logistiques. En intégrant la Blockchain, le Port de Brisbane a pu créer un système qui offre un suivi en temps réel des conteneurs, réduit les délais de traitement et optimise les opérations de manutention. Cette technologie a permis de garantir la transparence et la sécurité des données tout au long de la chaîne d'approvisionnement portuaire. En prenant l'initiative d'adopter la Blockchain tôt, le Port de Brisbane a non seulement amélioré ses propres opérations, mais a également servi de modèle pour d'autres ports en Australie et au-delà, illustrant une adoption proactive de l'innovation technologique (Port of Brisbane, 2019).

Figure 1 : Cartographie mondiale des initiatives Blockchain dans le commerce international par continent



Source : Élaboration par les auteurs à partir des données de la partie pratique

5. Discussion

5.1. La Blockchain dans la gestion moderne de la chaîne d'approvisionnement maritime

Proposition 1. (Taille de l'entreprise) : L'adoption de la Blockchain est majoritairement portée par de grandes entreprises privées en raison des coûts élevés et des ressources nécessaires pour la mise en œuvre de cette technologie. Ces entreprises disposent des capacités techniques et financières requises, ce qui leur permet de piloter des projets à grande échelle. En revanche, les petites et moyennes entreprises (PME), bien qu'ayant un intérêt croissant pour la Blockchain, s'appuient souvent sur des partenariats stratégiques avec des leaders du marché pour accéder à ces solutions. Le projet TradeLens, initié par Maersk et IBM, est un exemple concret de collaboration interentreprises visant à maximiser les avantages de la Blockchain dans un environnement maritime complexe.

Proposition 2. (Forme de propriété) : Dans les secteurs stratégiques ou partiellement régulés par l'État, la Blockchain est souvent promue par des entreprises privées avec un soutien gouvernemental indirect. Ce cadre mixte permet de répondre aux exigences économiques et réglementaires tout en intégrant les autorités publiques, comme les douanes et les agences portuaires, pour renforcer la transparence et la sécurité des transactions. Les plateformes Blockchain, bien qu'opérées par des acteurs privés, facilitent ainsi une meilleure régulation des opérations tout en alignant les objectifs commerciaux et publics.

Proposition 3. (Collaboration avec d'autres parties) : Le déploiement de la Blockchain nécessite une collaboration étroite entre les entreprises utilisatrices et les fournisseurs de solutions technologiques. En effet, cette technologie complexe requiert des compétences

techniques souvent concentrées dans des centres de recherche et des institutions académiques. Les fournisseurs jouent un rôle essentiel en fournissant des solutions clés en main et en assurant la maintenance des plateformes. Même les grandes entreprises préfèrent externaliser une partie de ces compétences pour garantir une mise en œuvre optimale et réduire les risques liés à l'innovation technologique.

Proposition 4. (Échelle de la mise en œuvre de la Blockchain) : La Blockchain est généralement déployée à une échelle mondiale pour répondre aux besoins globaux des chaînes d'approvisionnement. Cependant, certains projets, notamment dans des contextes publics ou expérimentaux, privilégient une mise en œuvre locale. Par exemple, dans des régions comme l'Australie et l'Afrique, les initiatives Blockchain se concentrent souvent sur des ports spécifiques, en raison des contraintes budgétaires et de la nécessité d'acquérir une expertise locale avant d'étendre leur portée. À l'inverse, les grandes entreprises privées visent à maximiser la couverture en intégrant leurs partenaires mondiaux dans des solutions Blockchain interconnectées.

Table 3 : Initiatives d'entreprises et d'autorités portuaires dans l'intégration de la Blockchain par continent.

<i>Société</i>	<i>Taille de l'Entreprise</i>	<i>Forme de Propriété</i>	<i>Collaboration avec d'autres Parties</i>	<i>Échelle de Mise en Œuvre de la Blockchain</i>
Maersk et IBM – TradeLens	Grande	Privée (Partenariat)	Transporteurs, ports, autorités douanières (collaboration avec IBM)	Globale
Hapag-Lloyd	Grande	Privée	Divers acteurs de la chaîne d'approvisionnement maritime	Régionale (Amérique du Sud)
CMA CGM	Grande	Privée	Partenaires commerciaux, institutions financières	Globale
CargoSmart	Grande	Privée	Acteurs de la chaîne d'approvisionnement maritime (collaboration avec COSCO Shipping)	Régionale (Asie)
Evergreen Marine	Grande	Privée	Acteurs du secteur maritime	Régionale (Asie)
Kenya ports authority	Grande	Publique	Producteurs, partenaires commerciaux, consommateurs	Régionale (Afrique)
Port of Brisbane	Grande	Publique	Acteurs du port et de la chaîne d'approvisionnement	Régionale (Australie)

Source : Élaboration par les auteurs à partir des données empiriques

5.2. La Blockchain dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement et son lien avec l'innovation ouverte

L'efficacité des entreprises modernes dépend en grande partie de celle de leurs chaînes d'approvisionnement internationales. Pour optimiser ces processus, l'innovation ouverte se révèle essentielle, car elle favorise la création de chaînes d'approvisionnement plus récentes et transparentes (Yun, Kim, & Yan, 2020). Yun et Yigitcanlar (2017) ont identifié cinq domaines clés pour l'application de l'innovation ouverte dans ce contexte : l'innovation par les utilisateurs, l'innovation par les clients, l'innovation interne, ainsi que deux types de communautés : celles de profit commun et celles de croissance conjointe. Chacun de ces domaines bénéficie grandement des apports de la Blockchain. Selon de la Rosa et al. (2017), la Blockchain se positionne comme une technologie fondamentale pour les écosystèmes d'innovation ouverte, offrant des solutions durables aussi bien pour les grandes entreprises que pour les PME. L'utilisation de l'innovation ouverte pour les tâches logistiques est largement explorée dans la littérature. Par exemple, Diouf et Kwak (2018) ont appliqué l'analyse hiérarchique floue et l'enveloppement des données pour sélectionner les meilleurs fournisseurs dans ce cadre. De plus, les applications de DEA dans les chaînes d'approvisionnement sont examinées par Li et

al. (2020) et Cooper et al. (2011). Les entreprises virtuelles, bien que tirant parti de l'innovation ouverte pour rester compétitives, doivent surmonter des défis liés à la gestion des risques en raison de la diversité de leurs partenaires. Des modèles basés sur la logique floue ont été développés pour répondre à ces défis (Santos et al., 2020). L'intégration de la Blockchain dans les chaînes d'approvisionnement a prouvé son efficacité à travers divers projets internationaux. Toutefois, cette intégration est plus marquée dans les pays développés tels que les États-Unis, le Royaume-Uni et l'Allemagne, avec moins de publications en Amérique latine et en Afrique (Queiroz, Telles, & Bonilla, 2019). Néanmoins, des pays émergents comme la Russie montrent un engagement actif envers la Blockchain dans leurs processus logistiques, suggérant que cette technologie pourrait également bénéficier aux chaînes d'approvisionnement dans ces régions en développement.

6. Conclusion

En conclusion de cette analyse, il apparaît clairement que la technologie Blockchain, en synergie avec l'Internet des objets (IoT), représente un levier stratégique pour transformer les chaînes logistiques maritimes, en catalysant l'émergence de ports intelligents plus résilients, plus efficaces et plus transparents. S'appuyant sur une approche comparative et multicontinentale, notre analyse a mis en évidence des dynamiques d'adoption différenciées selon les contextes institutionnels, économiques et technologiques. Les résultats confirment que la Blockchain améliore significativement la traçabilité, la sécurité et l'efficacité des opérations portuaires, tout en renforçant la confiance entre les acteurs de la logistique. Cependant, cette transition technologique reste conditionnée par la capacité des entreprises à mobiliser des investissements conséquents, des compétences spécialisées et des partenariats technologiques solides. Si de grandes entreprises privées telles que Maersk, CMA CGM et CargoSmart ouvrent la voie dans les régions à forte intensité technologique (Amérique du Nord, Europe et Asie), d'autres régions comme l'Afrique et l'Australie s'appuient davantage sur des partenariats public-privé et un soutien institutionnel pour lancer ou soutenir des projets pilotes.

Une lecture transversale des cas étudiés montre également que l'intégration de la Blockchain n'est pas uniforme : elle varie en fonction de la taille de l'entreprise, du niveau de collaboration inter-organisationnelle et de l'échelle géographique de mise en œuvre. Alors que certains ports utilisent la technologie uniquement pour numériser et sécuriser des documents commerciaux, d'autres l'utilisent pour construire de véritables écosystèmes portuaires numériques interconnectés. Cette diversité d'approche met en évidence un certain nombre de défis non résolus, notamment la gouvernance des données, l'interopérabilité entre des systèmes numériques hétérogènes, la dépendance à l'égard des fournisseurs de technologie et le manque de ressources humaines qualifiées. Sur le plan théorique, notre travail illustre comment la Blockchain s'inscrit dans des logiques d'innovation ouverte en facilitant la coopération entre entreprises et institutions, et en renforçant les capacités collectives d'adaptation face aux mutations du commerce international. Il contribue également à combler une lacune identifiée dans la littérature : le manque d'études empiriques comparatives sur l'application de la Blockchain dans la logistique maritime en fonction des contextes géographiques.

Les perspectives ouvertes par cette recherche sont multiples. D'une part, il serait pertinent d'approfondir l'analyse des déterminants institutionnels et culturels qui influencent l'adoption de la Blockchain dans les pays en développement, notamment en Afrique et en Amérique latine. D'autre part, les recherches futures pourraient mobiliser des approches quantitatives pour mesurer les impacts économiques et environnementaux des Smart Ports basés sur la Blockchain. Enfin, l'élargissement du champ d'étude à d'autres technologies émergentes permettrait une évaluation intégrée de la transformation numérique des chaînes logistiques

maritimes. Une attention particulière devra également être portée à la régulation internationale de ces technologies, en vue de garantir leur gouvernance éthique, inclusive et durable.

Références :

- (1). Al Abdouli, J., & Sipos, A. (2024). An overview of the dynamic and complex regulatory landscape of cargo transportation in the United Arab Emirates. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(9), 6586.
- (2). Alphand, o., et al. (2018). Iot chain: a Blockchain security architecture for the internet of things. In *proceedings of the wireless communications and networking conference (wcnc)* (pp. 1–6). Ieee. <https://doi.org/10.1109/wcnc.2018.8377321>
- (3). Augusto, A., Belchior, R., Correia, M., Vasconcelos, A., Zhang, L., & Hardjono, T. (2024, May). Sok: Security and privacy of Blockchain interoperability. In *2024 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)* (pp. 3840-3865). IEEE.
- (4). Bahga, a., & madiseti, v. K. (2016). Blockchain platform for industrial internet of things. *Journal of computer sciences and communications*, 9(10), 533–546. <https://doi.org/10.4236/jcc.2016.910046>
- (5). Buterin, v. (2015, august 7). On public and private Blockchains. *Ethereum blog*. <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-Blockchains/>
- (6). Cachin, c., sornioti, m. V., & weigold, t. (2016). Blockchain, cryptography, and consensus. *Ibm research*.
- (7). Cooper, w. W., seiford, l. M., & zhu, j. (2011). Data envelopment analysis: history, models, and interpretations. *International series in operations research & management science*; springer.
- (8). Dafir, A. (2021). L'internationalisation des entreprises marocaines en Afrique Subsaharienne: Quels enjeux?. *Maghreb-Machrek*, (1), 5-15.
- (9). DAFIR, A., & IMARHANE, H. (2024). Gestion des risques dans l'administration des douanes marocaine: enjeux et perspectives. *International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics*, 5(11), 726-734. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14559947>
- (10). De la rosa, j. L., torres-padrosa, v., el-fakdi, a., gibovic, d., hornyák, o., maicher, l., & miralles, f. (2017). A survey of Blockchain technologies for open innovation. In *proceedings of the world open innovation conference, san francisco, ca, usa, 13–15 december 2017* (pp. 1–27).
- (11). Diouf, m., & kwak, c. (2018). Fuzzy ahp, dea, and managerial analysis for supplier selection and development; from the perspective of open innovation. *Sustainability*, 10(11), 3779. <https://doi.org/10.3390/su10113779>
- (12). Freire, W. P., Melo, W. S., et al. (2022). Towards a Secure and Scalable Maritime Monitoring System Using Blockchain and Low-Cost IoT Technology.
- (13). Garay, J., Kiayias, A., & Leonardos, N. (2024). The bitcoin backbone protocol: Analysis and applications. *Journal of the ACM*, 71(4), 1-49.
- (14). Gervais, a., karame, g. O., wüst, k., glykantzis, v., ritzdorf, h., & čapkun, s. (2016). On the security and performance of proof of work Blockchains. In *proceedings of the 2016 acm sigsac conference on computer and communications security* (pp. 33–44). Acm. <https://doi.org/10.1145/2976749.2978347>
- (15). Glas, a. H. (2018). The impact of procurement on supplier satisfaction: service, communication, and speed. *International journal of integrated supply management*, 12(1), 90–104. <https://doi.org/10.1504/ijism.2018.10014616>
- (16). González-Cancelas, N., Orive, A. C., Cabrero, J. V., & Flores, F. S. (2024). Digital Transformation in Spanish Port System.

- (17). Helo, p., & hao, y. (2019). Blockchains in operations and supply chains: a model and reference implementation. *Computers & industrial engineering*, 136, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.08.005>
- (18). Jiang, Y., et al. (2023). LBlockchainE: A Lightweight Blockchain for Edge IoT-Enabled Maritime Transportation Systems.
- (19). Kang, j., xiong, z., niyato, d., wang, p., ye, d., & kim, d. I. (2018). Incentivizing consensus propagation in proof-of-stake based consortium Blockchain networks. *Ieee wireless communications letters*, 8(1), 157–160. <https://doi.org/10.1109/lwc.2018.2889442>
- (20). Kaštelan, N., Vidan, P., Assani, N., & Miličević, M. (2024). Digital Horizon: Assessing Current Status of Digitalization in Maritime Industry. *Transactions on Maritime Science*, 13(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n01.w13>
- (21). Kim, H., Xiao, Z., Zhang, X., Fu, X., & Qin, Z. (2024). Rethinking Blockchain Technologies for the Maritime Industry: An Overview of the Current Landscape. *Future Internet*, 16(12), 454.
- (22). Kshetri, n. (2018). Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International journal of information management*, 39, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005>
- (23). Lashkari, B., & Musilek, P. (2021). A comprehensive review of Blockchain consensus mechanisms. *IEEE access*, 9, 43620–43652.
- (24). Lee, m., yun, j., pyka, a., won, d., kodama, f., schiuma, g., park, h., jeon, j., park, k., jung, k., et al. (2018). How to respond to the fourth industrial revolution, or the second information technology revolution? Dynamic new combinations between technology, market, and society through open innovation. *Journal of open innovation: technology, market, and complexity*, 4(1), 21. <https://doi.org/10.3390/joits4010021>
- (25). Lewis, r., mcpartland, j., & ranjan, r. (2017). Blockchain and financial market innovation. *Economic perspectives*, 41(1), 1–17.
- (26). Li, c., & zhang, l. J. (2017). A Blockchain based new secure multi-layer network model for internet of things. In *proceedings of the ieee international congress on internet of things (iciot)* (pp. 33–41). Ieee. <https://doi.org/10.1109/iciot.2017.27>
- (27). Li, s., & xu, l. (2017). *Securing the internet of things*. Syngress publishing.
- (28). Li, w., cook, w. D., li, z., & zhu, j. (2020). Efficiency measurement for hierarchical situations. *Journal of the operational research society*, 71(5), 773–782. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1616405>
- (29). Lu, y., & xu, l. D. (2018). Internet of things (iot) cybersecurity research: a review of current research topics. *Ieee internet of things journal*, early access. <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2869847>
- (30). Meredith, j. (1998). Building operations management theory through case and field research. *Journal of operations management*, 16(4), 441–454. [https://doi.org/10.1016/s0272-6963\(98\)00023-1](https://doi.org/10.1016/s0272-6963(98)00023-1)
- (31). Moukafi, F., & Dafir, A. (2025). A Survey on Applications of Distributed Ledger Technology in International Trade. *Engineering Proceedings*, 97(1), 18.
- (32). Montecchi, m., plangger, k., & etter, m. (2019). It's real, trust me! Establishing supply chain provenance using Blockchain. *Business horizons*, 62(3), 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.01.008>
- (33). Pajic, V., Andrejic, M., & Chatterjee, P. (2024). Enhancing cold chain logistics: A framework for advanced temperature monitoring in transportation and storage. *Mechatron. Intell Transp. Syst*, 3(1), 16–30.
- (34). Queiroz, m. M., telles, r., & bonilla, s. H. (2019). Blockchain and supply chain management integration: a systematic review of the literature. *Supply chain*

- management: an international journal, 25(2), 241–254. <https://doi.org/10.1108/scm-12-2018-0395>
- (35). Safuan, S., et al. (2024). Artificial Intelligence in Indonesian Ports: Opportunities and Challenges.
- (36). Sankar, I. S., Sindhu, M., & Sethumadhavan, M. (2017). Survey of consensus protocols on Blockchain applications. In *proceedings of the 4th international conference on advanced computing and communication systems (icaccs)* (pp. 1–5). Ieee. <https://doi.org/10.1109/icaccs.2017.8014524>
- (37). Santos, R., Abreu, A., Calado, J. M. F., Soares, J. M., & Martins, J. D. M. (2020). A framework based on fuzzy logic to manage risk in an open innovation context. In I. M. Camarinha-matos, H. Afsarmanesh, & A. Ortiz (eds.), *boosting collaborative networks 4.0* (pp. 336–349). Springer international publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33240-4_24
- (38). Schmidt, C. G., & Wagner, S. M. (2019). Blockchain and supply chain relations: a transaction cost theory perspective. *Journal of purchasing and supply management*, 25(2), 100552. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2019.100552>
- (39). Scully, P., & Hobig, M. (2019). Exploring the impact of Blockchain on digitized supply chain flows: a literature review. In *proceedings of the 2019 sixth international conference on software defined systems (sds)* (pp. 278–283). Ieee. <https://doi.org/10.1109/sds.2019.00050>
- (40). Seebacher, S., & Schüritz, R. (2017). Blockchain technology as an enabler of service systems: a structured literature review. In *proceedings of the international conference on exploring services science* (pp. 12–23). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56925-3_2
- (41). Shoetan, P. O., & Familoni, B. T. (2024). Blockchain's impact on financial security and efficiency beyond cryptocurrency uses. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(4), 1211-1235.
- (42). Song, D. P. (2024). A Literature Review of Seaport Decarbonisation: Solution Measures and Roadmap to Net Zero. *Sustainability*, 16(4), 1620.
- (43). Subhan, M. R., Golam, M., Rahaman, M. F., Alam, M. M., Kim, D. S., & Jun, T. (2024, October). A Blockchain-Based System for Efficient, Traceable, and Transparent Maritime Logistics. In *2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 1315-1319). IEEE.
- (44). Tijan, E., Aksentijević, S., Ivanić, K., & Jardas, M. (2019). Blockchain technology implementation in logistics. *Sustainability*, 11(5), 1185. <https://doi.org/10.3390/su11051185>
- (45). Tiwari, S., Wee, H. M., & Daryanto, Y. (2018). Big data analytics in supply chain management between 2010 and 2016: insights to industries. *Computers & industrial engineering*, 115, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.012>
- (46). Vukolić, M. (2015). The quest for scalable Blockchain fabric: proof-of-work vs. BFT replication. In *proceedings of the ifip wg 11.4 workshop on open research problems in network security (inetsec)* (pp. 112–125). Springer. http://www.vukolic.com/inetsec_2015.pdf
- (47). Xiao, Y., Zhang, N., Lou, W., & Hou, Y. T. (2020). A survey of distributed consensus protocols for Blockchain networks. *Ieee communications surveys & tutorials*, 22(3), 1432–1465. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.2983548>
- (48). Yun, J. H. J., & Yigitcanlar, T. (2017). Open innovation in value chain for sustainability of firms. *Sustainability*, 9(5), 881. <https://doi.org/10.3390/su9050881>

- (49). Yun, j. J., kim, d., & yan, m. R. (2020). Open innovation engineering—preliminary study on new entrance of technology to market. *Electronics*, 9(5), 791. <https://doi.org/10.3390/electronics9050791>
- (50). Zhang, P., et al. (2023). A Blockchain-Based Authentication Scheme and Secure Architecture for IoT-Enabled Maritime Transportation Systems.