

Vers une gestion collaborative et sécurisée des chaînes d'approvisionnement : intégration d'une blockchain permissionnée et de l'apprentissage fédéré

Imene Benyahia¹, Mohamed El Amine Brahmia ²

¹ Université de Batna, Algérie, imene.benyahia2@gmail.com

² LINEACT CESI UR 7527, France, abrahmia@cesi.fr

Résumé : La transformation numérique des chaînes d'approvisionnement nécessite des mécanismes permettant de concilier collaboration inter-organisationnelle et protection des données sensibles. Cependant, le partage d'informations entre partenaires reste limité en raison de contraintes liées à la confidentialité, à la sécurité et à la confiance. Cet article propose une architecture conceptuelle intégrée combinant une blockchain permissionnée et l'apprentissage fédéré afin de répondre à ces enjeux. La blockchain assure la traçabilité, la gouvernance et l'intégrité des interactions, tandis que l'apprentissage fédéré permet de construire des modèles collaboratifs sans partage des données brutes. L'approche repose sur un mécanisme de sélection commun des nœuds et une organisation hiérarchique de l'apprentissage, adaptée aux spécificités des chaînes d'approvisionnement distribuées. Les résultats attendus mettent en évidence le potentiel de cette intégration pour améliorer la transparence, la confiance et la performance décisionnelle dans les réseaux logistiques.

Mots clés : Apprentissage fédéré, Blockchain permissionnée, Chaîne d'approvisionnement, Collaboration inter-organisationnelle, Gouvernance distribuée

Toward collaborative and secure supply chain management: integrating a permissioned blockchain and federated learning

Abstract: The digital transformation of supply chains requires mechanisms that reconcile inter-organizational collaboration with the protection of sensitive data. However, information sharing among partners remains limited due to concerns related to confidentiality, security, and trust. This paper proposes an integrated conceptual architecture combining a permissioned blockchain and federated learning to address these challenges. The blockchain ensures traceability, governance, and integrity of interactions, while federated learning enables the development of collaborative models without sharing raw data. The proposed approach relies on a common node selection mechanism and a hierarchical learning structure adapted to distributed supply chain environments. The expected outcomes highlight the potential of this integration to enhance transparency, trust, and decision-making performance in logistics networks.

Keywords: Federated learning, Permissioned blockchain, Supply chain, Inter-organizational collaboration, Distributed governance

Citation : Benyahia, I., & BRAHMIA, M. E. A., (2026), Vers une gestion collaborative et sécurisée des chaînes d'approvisionnement : intégration d'une blockchain permissionnée et de l'apprentissage fédéré. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 40(1), 69-81.

<https://doi.org/10.53102/2026.40.1283>

Historique : reçu le 05/04/2026, accepté le 15/04/2026, en ligne le 17/04/2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), permitting all non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

La transformation numérique des chaînes d'approvisionnement constitue aujourd'hui un enjeu stratégique majeur pour les organisations industrielles confrontées à un environnement caractérisé par une complexité croissante, une forte interdépendance entre acteurs et une incertitude accrue. Les disruptions récentes ont renforcé la nécessité d'améliorer la résilience, la visibilité et la coordination au sein des réseaux logistiques, en particulier dans des contextes multi-acteurs distribués (Ivanov & Dolgui, 2020). Dans ce cadre, la collaboration inter-organisationnelle apparaît comme un levier essentiel de performance, reposant sur la capacité des entreprises à partager et exploiter efficacement des informations tout au long de la chaîne de valeur (Cao & Zhang, 2011 ; Queiroz & Wamba, 2019).

Cependant, cette dynamique collaborative se heurte à une tension structurelle entre la nécessité de partager des données et les exigences de confidentialité, de sécurité et de protection des intérêts stratégiques des organisations (Barratt, 2004). Cette problématique est d'autant plus critique que l'exploitation avancée des données, notamment à travers des approches d'intelligence artificielle, nécessite des volumes importants d'informations distribuées et souvent sensibles. Dans ce contexte, les entreprises restent réticentes à mutualiser leurs données, limitant ainsi le potentiel des approches analytiques collaboratives.

L'apprentissage fédéré s'impose comme une réponse prometteuse à ces enjeux en permettant la construction de modèles collaboratifs sans partage direct des données brutes. Initialement développé dans le domaine des systèmes distribués, il connaît aujourd'hui une adoption croissante dans plusieurs secteurs applicatifs. Dans le domaine de l'énergie, il est mobilisé pour l'optimisation de la consommation et la prévision énergétique dans des environnements distribués tels que les bâtiments intelligents (Abboud et al., 2023 ; Fakher et al., 2025a). Dans les environnements industriels et les systèmes IoT, il permet d'améliorer la prévision et la détection d'événements en exploitant des données issues de sources hétérogènes (Fakher et al.,

2025b). Par ailleurs, dans le secteur de la santé, l'apprentissage fédéré est utilisé pour développer des modèles collaboratifs tout en respectant les contraintes strictes de confidentialité des données médicales. Ces applications illustrent le potentiel du FL à soutenir des systèmes distribués où la donnée est à la fois stratégique et sensible.

Parallèlement, la blockchain permet d'instaurer un cadre de confiance en garantissant la traçabilité et l'intégrité des échanges dans des environnements distribués (Kshetri, 2018 ; Saberi et al., 2019). Dans les environnements industriels, ce mouvement s'est accompagné de travaux visant à adapter les blockchains permissionnées aux contraintes de performance et de gouvernance, notamment à travers l'amélioration des protocoles de consensus byzantins, comme l'illustre la proposition APBFT de Riahi et al. (2022).

Malgré leurs apports respectifs, ces approches présentent des limites importantes lorsqu'elles sont considérées isolément. La blockchain ne permet pas d'exploiter pleinement la valeur des données distribuées à des fins d'apprentissage, tandis que l'apprentissage fédéré souffre de défis liés à la confiance entre participants, à la traçabilité des contributions et à la gouvernance des interactions. Les travaux récents suggèrent ainsi une convergence entre ces deux technologies afin de tirer parti de leurs complémentarités, bien que ces approches restent encore peu structurées et insuffisamment adaptées aux spécificités des chaînes d'approvisionnement.

Dans ce contexte, cet article propose une approche intégrée combinant une blockchain permissionnée et l'apprentissage fédéré afin de soutenir une gestion collaborative et sécurisée de la supply chain. L'objectif est de concevoir une architecture conceptuelle permettant d'assurer la confidentialité des données tout en garantissant la traçabilité des interactions et la confiance entre partenaires. Cette approche vise également à faciliter l'adoption de solutions d'intelligence artificielle dans des environnements logistiques distribués, en structurant les mécanismes de gouvernance et de coordination.

L'article est organisé comme suit. La section suivante présente un état de l'art structuré portant

respectivement sur la blockchain, l'apprentissage fédéré et leurs approches hybrides. Une analyse comparative des solutions existantes est ensuite proposée afin d'identifier les principales limites et les verrous scientifiques. Sur cette base, une architecture conceptuelle intégrée est développée, mettant en évidence les interactions entre les différents composants du système. Enfin, une discussion des implications managériales est proposée avant de conclure.

2. ETAT DE L'ART

2.1 Blockchain dans les chaînes d'approvisionnement : apports et limites

L'intégration de la blockchain dans les chaînes d'approvisionnement s'inscrit dans une dynamique récente de transformation numérique visant à améliorer la transparence, la traçabilité et la coordination des flux logistiques dans des environnements distribués. Les travaux récents mettent en évidence le rôle de la blockchain comme infrastructure de confiance permettant de réduire les asymétries d'information et d'améliorer la visibilité des opérations au sein de réseaux multi-acteurs (Derrouiche et al., 2022 ; Pournader et al., 2020). Dans ce contexte, la blockchain est mobilisée pour renforcer la fiabilité des échanges d'informations et soutenir des mécanismes de collaboration plus efficaces entre partenaires.

Plusieurs études récentes montrent que la blockchain permet d'améliorer significativement la traçabilité des produits et la transparence des processus, notamment dans les secteurs agroalimentaire, pharmaceutique et industriel. Elle facilite également l'automatisation de certaines interactions à travers les contrats intelligents, contribuant ainsi à réduire les coûts de coordination et à limiter les risques d'erreurs ou de fraude (Kouhizadeh et al., 2021). Par ailleurs, l'intégration de la blockchain avec des technologies telles que l'Internet des objets permet de garantir l'intégrité des données collectées tout au long de la chaîne logistique, en assurant leur immutabilité et leur auditabilité dans des environnements fortement distribués (Elock et al., 2023).

Cependant, malgré ces apports, la mise en œuvre de la blockchain dans les environnements industriels soulève des défis techniques et organisationnels importants. Les limitations en termes de scalabilité, de latence et de consommation de ressources ont conduit à privilégier des architectures permissionnées, mieux adaptées aux contraintes des systèmes logistiques. Dans ce cadre, les mécanismes de consensus constituent un élément clé pour garantir la cohérence du registre distribué tout en assurant des performances compatibles avec les exigences opérationnelles.

Les travaux récents de Riahi et al. (2022a, 2022b) s'inscrivent dans cette perspective en proposant des améliorations des protocoles de consensus de type PBFT pour les blockchains privées. Le protocole APBFT introduit une approche adaptative permettant d'optimiser dynamiquement le processus de validation, tandis que FPBFT vise à réduire les délais de consensus et à améliorer la performance globale du réseau. Ces contributions répondent directement aux besoins des systèmes industriels distribués, où la rapidité et la fiabilité des transactions sont des facteurs critiques.

Au-delà de ces optimisations, des recherches récentes explorent l'intégration de techniques d'apprentissage automatique dans les mécanismes de consensus afin d'améliorer leur adaptabilité. Riahi et al. (2024) proposent ainsi une approche basée sur le multi-task learning pour optimiser dynamiquement les performances des blockchains permissionnées. Par ailleurs, l'étude comparative de Riahi et al. (2023) met en évidence l'importance du choix des plateformes blockchain en fonction des exigences applicatives, notamment en termes de performance, de sécurité et de flexibilité.

Malgré ces avancées, la blockchain présente encore plusieurs limites dans le contexte des chaînes d'approvisionnement. Elle ne permet pas, à elle seule, d'exploiter efficacement la valeur des données distribuées pour des processus d'analyse avancés, ce qui limite son utilisation dans des applications d'intelligence décisionnelle. De plus, les mécanismes de consensus, même optimisés, introduisent des coûts computationnels et des délais qui peuvent être incompatibles avec certaines applications en temps réel. Enfin, la blockchain ne

traite pas directement les problématiques liées à l'apprentissage collaboratif et à l'exploitation conjointe des données entre acteurs.

Ces limites mettent en évidence la nécessité d'intégrer des approches complémentaires capables de valoriser les données distribuées tout en préservant leur confidentialité. L'apprentissage fédéré constitue à cet égard une solution particulièrement pertinente, en permettant de concilier exploitation des données et respect des contraintes de confidentialité dans des environnements distribués, comme nous le développons dans la section suivante.

2.2 Apprentissage fédéré : apports, limites et perspectives pour les chaînes d'approvisionnement

L'apprentissage fédéré constitue une évolution majeure des approches d'apprentissage automatique dans les environnements distribués, en permettant la construction de modèles collaboratifs sans partage des données brutes entre participants. Dans le contexte des chaînes d'approvisionnement, cette caractéristique répond directement aux contraintes liées à la confidentialité des données et à la réticence des entreprises à partager des informations stratégiques. En effet, les acteurs de la chaîne logistique disposent de données complémentaires, telles que les historiques de demande, les capacités de production ou les flux logistiques, dont l'exploitation conjointe pourrait améliorer significativement la performance globale du réseau. L'apprentissage fédéré offre ainsi la possibilité de mutualiser l'intelligence sans exposer les données sensibles, ce qui en fait une approche particulièrement pertinente pour les systèmes logistiques collaboratifs (Nguyen et al., 2022 ; Kairouz et al., 2021).

Dans les applications liées aux chaînes d'approvisionnement, l'apprentissage fédéré est mobilisé pour des cas d'usage tels que la prévision collaborative de la demande, l'optimisation des stocks ou encore la détection d'anomalies dans les flux logistiques. Par exemple, dans des réseaux de distribution multi-acteurs, il permet d'entraîner des modèles de prévision en combinant les données de

plusieurs partenaires, tout en respectant les contraintes de confidentialité. De même, dans les systèmes industriels connectés, il peut être utilisé pour améliorer la maintenance prédictive en agrégeant les connaissances issues de plusieurs sites de production sans centraliser les données (Zhang et al., 2021).

Les travaux récents ont permis d'améliorer significativement les mécanismes sous-jacents à l'apprentissage fédéré, en particulier les stratégies d'agrégation des modèles locaux. Arbaoui et al. (2024) proposent une taxonomie détaillée des techniques d'agrégation, mettant en évidence leur impact sur la performance et la robustesse des modèles dans des environnements hétérogènes. Dans une perspective applicative, ces mécanismes sont essentiels pour garantir la qualité des modèles dans des chaînes d'approvisionnement caractérisées par des données non homogènes et des comportements variés des acteurs.

La question de la fiabilité des contributions constitue également un enjeu central dans les systèmes d'apprentissage fédéré appliqués à la chaîne logistique. Dans des environnements où les acteurs peuvent avoir des intérêts divergents, la présence de données de mauvaise qualité ou de comportements malveillants peut dégrader les performances du modèle global. Arbaoui et al. (2022) proposent ainsi des mécanismes d'agrégation sécurisée permettant d'améliorer la robustesse des modèles dans des contextes sensibles. De même, Fakher et al. (2025) introduisent une approche de sélection des participants basée sur la détection d'anomalies, particulièrement pertinente dans des systèmes logistiques distribués où la fiabilité des données peut varier d'un acteur à l'autre.

Par ailleurs, la gestion de l'hétérogénéité des environnements constitue un défi majeur dans les applications industrielles de l'apprentissage fédéré. Les acteurs d'une chaîne d'approvisionnement disposent de ressources de calcul différentes et de volumes de données variables, ce qui peut affecter la convergence des modèles. Baahmed et al. (2024) montrent que le choix des hyperparamètres influence fortement l'efficacité des processus d'apprentissage dans des environnements

distribués, soulignant la nécessité d'adapter les mécanismes d'apprentissage aux contraintes opérationnelles. Dans cette même logique, des travaux récents proposent des approches hiérarchiques permettant de structurer l'apprentissage dans des systèmes complexes, en particulier dans les environnements liés à l'Internet des objets (Baahmed et al., 2026).

Malgré ces avancées, plusieurs limites persistent dans l'application de l'apprentissage fédéré aux chaînes d'approvisionnement. Tout d'abord, l'absence de mécanismes robustes de confiance entre participants constitue un frein majeur à son adoption dans des environnements inter-organisationnels. En effet, les acteurs doivent pouvoir s'assurer de l'intégrité des contributions et de la fiabilité des modèles partagés. Ensuite, la traçabilité des mises à jour de modèles reste limitée, ce qui complique l'audit et la gouvernance des processus d'apprentissage. Enfin, la coordination des cycles d'apprentissage dans des systèmes multi-acteurs distribués pose des défis organisationnels importants, notamment en termes de synchronisation et de gestion des contributions.

2.3 Intégration de la blockchain et de l'apprentissage fédéré : analyse critique des approches existantes

L'intégration de la blockchain et de l'apprentissage fédéré s'inscrit dans une dynamique récente visant à concevoir des systèmes distribués capables de concilier sécurité, confiance et exploitation des données. Dans le contexte des chaînes d'approvisionnement, cette convergence répond à un besoin croissant de coordination entre acteurs tout en garantissant la confidentialité des informations stratégiques. Elle permet ainsi d'envisager des mécanismes de collaboration avancés, dans lesquels les données restent localisées tandis que les décisions sont construites de manière collective.

Plusieurs travaux récents ont exploré cette intégration en proposant des architectures hybrides combinant registres distribués et apprentissage collaboratif. Ces approches reposent généralement sur l'utilisation de la blockchain pour orchestrer les processus d'apprentissage, notamment en assurant

la traçabilité des mises à jour de modèles, la gestion des identités des participants et la sécurisation des échanges (Lu et al., 2020 ; Sharma et al., 2021). Dans les environnements industriels et logistiques, ces architectures présentent un potentiel important pour améliorer la collaboration inter-organisationnelle, en permettant notamment le développement de modèles de prévision partagés tout en respectant les contraintes de confidentialité.

Cependant, une analyse approfondie des travaux existants met en évidence plusieurs limites majeures, en particulier lorsqu'ils sont appliqués aux chaînes d'approvisionnement. Comme le synthétise le Tableau 1, les approches existantes peuvent être distinguées en trois grandes catégories (blockchain, apprentissage fédéré et approches hybrides), chacune présentant des apports spécifiques mais également des limites significatives.

Les approches basées uniquement sur la blockchain offrent des garanties fortes en matière de sécurité et de traçabilité, mais elles restent limitées dans leur capacité à exploiter les données distribuées pour des processus décisionnels avancés (Casino et al., 2019). À l'inverse, les approches fondées sur l'apprentissage fédéré permettent de préserver la confidentialité des données et de construire des modèles collaboratifs, mais elles souffrent d'un manque de mécanismes robustes de confiance et de gouvernance (Kairouz et al., 2021). Enfin, les approches hybrides apparaissent comme particulièrement prometteuses en combinant ces deux dimensions, mais elles restent encore peu matures et souvent insuffisamment adaptées aux contraintes spécifiques des chaînes d'approvisionnement, notamment en matière de coordination des acteurs et de gouvernance (Nguyen et al., 2022).

Plus précisément, le Tableau 1 met en évidence que les solutions existantes ne permettent pas de répondre simultanément aux trois exigences majeures des chaînes d'approvisionnement collaboratives : la confidentialité des données, la confiance entre partenaires et la valorisation collective des informations.

Table 1 : Analyse comparative des approches

| Approche | Apports principaux | Limites | Pertinence pour la supply chain |
|----------------------|--|--|--|
| Blockchain | Garantit la traçabilité des flux, la transparence des transactions et une confiance distribuée entre acteurs | Peu adaptée au traitement analytique avancé des données; performances parfois limitées par les mécanismes de consensus | Approche robuste pour la traçabilité et la gouvernance, mais incomplète pour les besoins d'analyse et de décision |
| Apprentissage fédéré | Permet un apprentissage collaboratif tout en préservant la confidentialité des données locales | Ne résout pas pleinement les enjeux de confiance, de vérifiabilité et de coordination entre organisations | Approche efficace pour l'analytique distribuée, mais insuffisante seule pour encadrer les interactions inter-organisationnelles |
| Approches hybrides | Associe la capacité de gouvernance et de traçabilité de la blockchain à la puissance analytique et collaborative de l'apprentissage fédéré | Intégration plus complexe, architecture encore émergente, verrous techniques et organisationnels persistants | Approche hautement prometteuse, car elle répond de manière conjointe aux exigences de sécurité, de confidentialité, de coordination et de création de valeur collective dans les chaînes d'approvisionnement |

Cette absence d'intégration constitue un frein à l'adoption de ces technologies dans des contextes industriels réels.

Par ailleurs, les architectures proposées dans la littérature restent majoritairement centrées sur des considérations techniques et abordent rarement de manière intégrée les dimensions organisationnelles, telles que la gestion des identités, le contrôle d'accès ou la gouvernance des interactions entre acteurs. Or, dans le contexte des chaînes d'approvisionnement, ces dimensions jouent un

rôle déterminant dans la réussite des démarches collaboratives.

Ces constats mettent en évidence un manque de cadres conceptuels intégrés permettant de structurer de manière cohérente l'utilisation conjointe de la blockchain et de l'apprentissage fédéré dans les chaînes d'approvisionnement. Il apparaît ainsi nécessaire de proposer des architectures capables de prendre en compte à la fois les contraintes techniques et les enjeux organisationnels de ces systèmes distribués.

Dans cette perspective, la section suivante propose une architecture conceptuelle intégrée combinant une blockchain permissionnée et l'apprentissage fédéré, visant à répondre aux limites identifiées et à soutenir une gestion collaborative, sécurisée et performante des chaînes d'approvisionnement.

3. ARCHITECTURE CONCEPTUELLE INTEGREE POUR UNE CHAINE D'APPROVISIONNEMENT DISTRIBUEE

L'objectif de cette étude est de proposer une architecture conceptuelle permettant de concilier collaboration inter-organisationnelle, confidentialité des données et exploitation collective de l'information dans les chaînes d'approvisionnement. Cette architecture repose sur l'intégration conjointe d'une blockchain permissionnée et d'un mécanisme d'apprentissage fédéré déployé dans un environnement distribué. Elle vise à répondre aux limites identifiées dans l'état de l'art, en particulier en matière de gouvernance, de confiance et de coordination des acteurs.

L'hypothèse centrale de l'architecture proposée est que les acteurs de la chaîne d'approvisionnement ne sont pas uniquement des participants aux échanges d'information, mais également des contributeurs actifs à un processus d'apprentissage collaboratif. Ainsi, chaque organisation participante (fournisseur, producteur, prestataire logistique ou distributeur) est associée à un nœud capable à la fois de participer au réseau blockchain et de contribuer à l'apprentissage fédéré. Cette dualité permet de rapprocher les mécanismes de gouvernance et les processus d'apprentissage, en évitant leur dissociation.

Comme l'illustre la Figure 1, l'architecture est structurée autour de trois niveaux principaux : le niveau métier de la chaîne d'approvisionnement, le niveau d'apprentissage distribué et le niveau de gouvernance blockchain.

Le premier niveau correspond aux acteurs métier de la chaîne d'approvisionnement. Chaque acteur dispose de ses propres données opérationnelles,

telles que les historiques de demande, les niveaux de stock, les délais de livraison ou les données issues de capteurs. Ces données restent localisées au sein des organisations et ne sont pas partagées directement avec les autres partenaires, afin de préserver leur confidentialité.

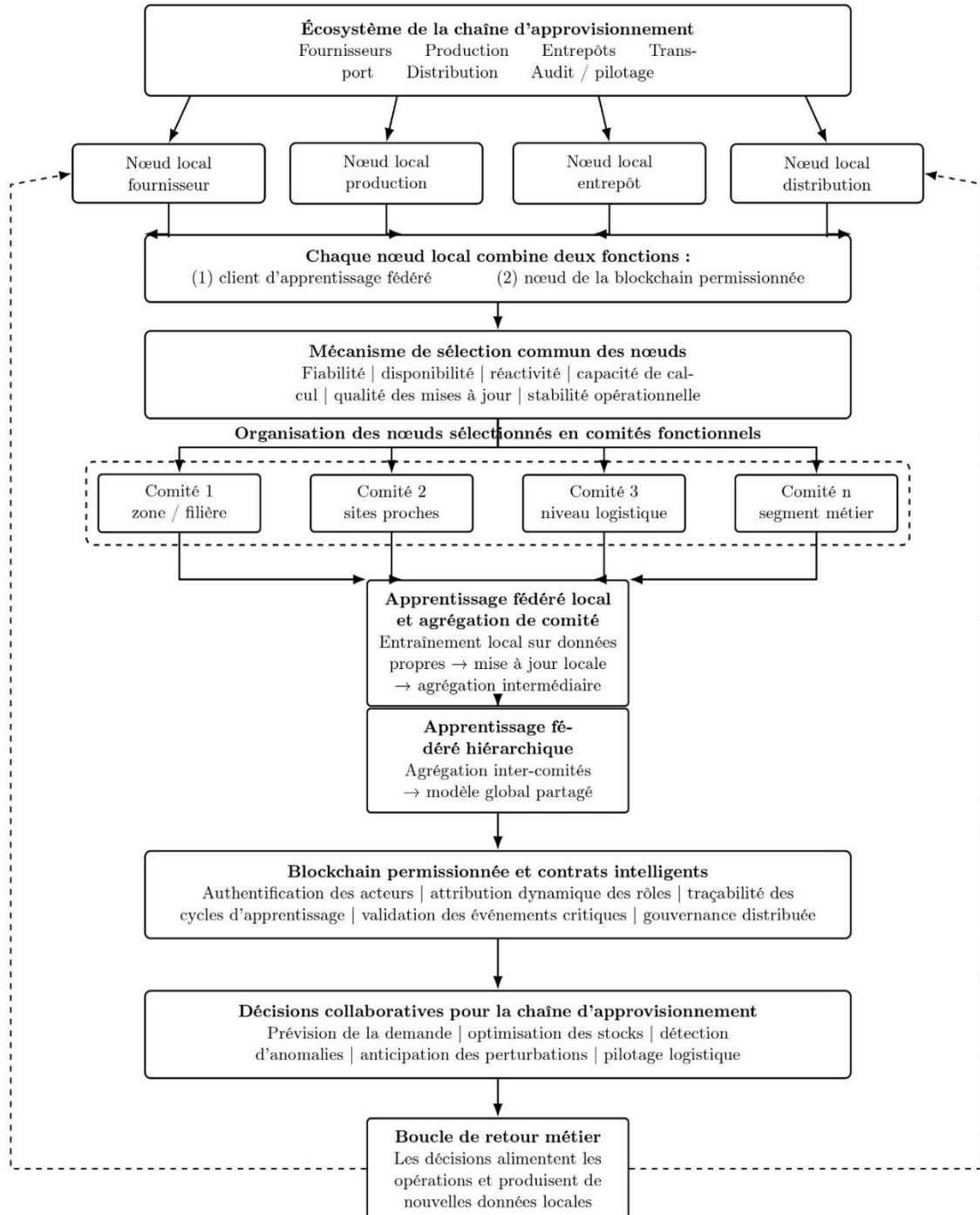


Figure 1 : Architecture conceptuelle intégrée combinant blockchain permissionnée et apprentissage fédéré de périphérie dans une chaîne d'approvisionnement distribuée

Le deuxième niveau correspond à l'apprentissage distribué, mis en œuvre selon une logique d'apprentissage fédéré en périphérie. Chaque nœud local entraîne un modèle à partir de ses données, puis partage uniquement des mises à jour de modèle. Cette approche permet de construire un modèle global sans centraliser les données. Elle est particulièrement adaptée aux chaînes d'approvisionnement, où les données sont hétérogènes, distribuées et souvent sensibles.

Le troisième niveau correspond à la blockchain permissionnée, qui assure les fonctions de gouvernance du système. Elle permet d'authentifier les participants, de gérer les droits d'accès, de tracer les interactions et de coordonner les cycles d'apprentissage. Elle joue ainsi un rôle structurant dans l'organisation de la collaboration entre acteurs.

L'un des éléments clés de l'architecture réside dans la mise en place d'un mécanisme de sélection commun des nœuds. Ce mécanisme évalue les participants selon plusieurs critères, tels que leur fiabilité, leur disponibilité, leur capacité de calcul et la qualité de leurs contributions au processus d'apprentissage. Sur cette base, il détermine leur participation aux différentes fonctions du système.

Ce mécanisme de sélection joue un rôle central, dans la mesure où il permet d'optimiser simultanément deux processus essentiels. D'une part, il contribue à la robustesse du réseau blockchain en sélectionnant des nœuds fiables pour les fonctions de validation et de gouvernance. D'autre part, il améliore la qualité de l'apprentissage fédéré en limitant la participation de nœuds susceptibles de dégrader le modèle global. L'utilisation d'un mécanisme unifié permet ainsi d'assurer une cohérence entre les dimensions techniques et organisationnelles du système.

Les nœuds sélectionnés sont organisés en comités fonctionnels, définis selon des critères opérationnels tels que la proximité géographique, le rôle dans la chaîne logistique ou la nature des données manipulées. Ces comités jouent un double rôle. Ils participent d'une part aux fonctions de gouvernance du réseau blockchain, et servent

d'autre part de structures intermédiaires pour l'apprentissage fédéré.

L'architecture repose ainsi sur un processus d'apprentissage hiérarchique. Les modèles sont d'abord entraînés localement au niveau de chaque nœud. Une première agrégation est réalisée au niveau des comités, permettant de produire des modèles intermédiaires. Ces modèles sont ensuite consolidés à un niveau global afin de construire un modèle partagé à l'échelle du réseau. Cette organisation permet de réduire les coûts de communication, d'améliorer la robustesse face à l'hétérogénéité des données et de mieux refléter la structure des chaînes d'approvisionnement.

La gouvernance du système est assurée par des mécanismes automatisés reposant sur des contrats intelligents. Ces derniers permettent de gérer l'identité des participants, d'attribuer dynamiquement les rôles, de contrôler les droits d'accès et d'enregistrer les différentes étapes du processus d'apprentissage. Cette gouvernance distribuée favorise la transparence et la traçabilité des interactions, tout en limitant la dépendance à une autorité centrale.

Enfin, l'architecture permet de produire un modèle global exploitable par les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement. Ce modèle peut être utilisé pour améliorer la prévision de la demande, optimiser les niveaux de stock, anticiper les perturbations logistiques ou détecter des anomalies dans les flux. Il constitue ainsi un support à la prise de décision collaborative, tout en respectant les contraintes de confidentialité et de sécurité.

En synthèse, l'architecture proposée repose sur une intégration étroite entre apprentissage fédéré et blockchain permissionnée, structurée autour d'un mécanisme de sélection commun et d'une organisation en comités. Elle permet de répondre simultanément aux enjeux de confidentialité, de confiance et d'exploitation des données dans les chaînes d'approvisionnement distribuées.

4. DISCUSSION ET DEFIS DE MISE EN ŒUVRE DANS LES CHAINES D'APPROVISIONNEMENT

L'architecture proposée introduit une nouvelle manière de structurer la collaboration dans les chaînes d'approvisionnement en combinant gouvernance distribuée et apprentissage collaboratif. Au-delà de sa formulation conceptuelle, son intérêt réside dans sa capacité à répondre à des problématiques concrètes rencontrées dans les systèmes logistiques. Cette section propose une lecture critique de l'approche en mettant en évidence ses apports dans des contextes applicatifs réels, ainsi que les défis associés à sa mise en œuvre.

4.1 Vers une collaboration basée sur le partage de connaissances

Dans les chaînes d'approvisionnement, la collaboration repose traditionnellement sur l'échange d'informations telles que les commandes, les niveaux de stock ou les prévisions. Toutefois, ces échanges restent souvent limités en raison de préoccupations liées à la confidentialité et à la concurrence entre acteurs.

L'architecture proposée permet d'envisager une évolution vers une collaboration fondée sur le partage de modèles plutôt que sur le partage de données. Par exemple, dans un réseau de distribution, plusieurs acteurs peuvent contribuer à un modèle de prévision de la demande sans exposer leurs données internes. De même, dans des environnements industriels, des sites de production peuvent collaborer pour améliorer la maintenance prédictive à partir de données locales.

Ce changement de paradigme présente un intérêt opérationnel fort, mais il soulève également un enjeu clé : la perception de la valeur créée. Dans une chaîne d'approvisionnement, certains acteurs disposent de données plus riches ou plus stratégiques que d'autres. La mise en place d'un modèle collaboratif nécessite donc de garantir que les bénéfices générés, en termes de précision des prévisions ou d'optimisation des flux, soient perçus comme équitablement distribués.

4.2 Le mécanisme de sélection comme levier de pilotage des interactions logistiques

Dans des contextes logistiques réels, tous les acteurs ne présentent pas le même niveau de fiabilité, de réactivité ou de qualité de données. Par exemple, certains fournisseurs peuvent être plus réguliers dans leurs livraisons, tandis que certains entrepôts disposent de systèmes d'information plus performants.

Le mécanisme de sélection proposé peut être interprété comme un outil de pilotage des interactions dans la chaîne d'approvisionnement. En privilégiant les nœuds les plus fiables pour les fonctions critiques, il permet de renforcer la robustesse des processus collaboratifs, qu'il s'agisse de validation des événements ou de contribution à des modèles prédictifs.

Cependant, dans un contexte opérationnel, ce mécanisme soulève des questions sensibles. La manière dont les acteurs sont évalués peut influencer leur position dans la chaîne et leur accès à certaines informations ou décisions. Il est donc essentiel que ce mécanisme soit perçu comme transparent et légitime. Dans le cas contraire, il pourrait générer des tensions entre partenaires, en particulier dans des réseaux où les relations sont déjà marquées par des asymétries de pouvoir.

4.3 Gestion de l'hétérogénéité dans les réseaux logistiques

Les chaînes d'approvisionnement sont caractérisées par une forte diversité d'acteurs, allant de grandes entreprises disposant de systèmes avancés à des structures plus petites avec des capacités limitées. Cette hétérogénéité se traduit par des différences importantes en matière de connectivité, de qualité des données et de ressources de calcul.

Dans ce contexte, l'architecture proposée offre des mécanismes permettant de gérer cette diversité, notamment à travers l'apprentissage distribué et l'organisation en comités. Par exemple, des entrepôts appartenant à une même zone géographique peuvent être regroupés pour produire des modèles intermédiaires adaptés à leur contexte local, tandis que des acteurs plus

structurés peuvent contribuer à des niveaux d'agrégation plus globaux.

Néanmoins, cette organisation introduit un défi important : éviter que les acteurs les moins performants soient progressivement marginalisés. Dans une chaîne d'approvisionnement, l'exclusion d'un partenaire peut avoir des conséquences opérationnelles significatives. Il est donc nécessaire de concevoir des mécanismes permettant de maintenir une participation minimale, tout en garantissant la performance globale du système.

4.4 Gouvernance et coordination dans des environnements multi-acteurs

Les chaînes d'approvisionnement impliquent des interactions complexes entre organisations juridiquement indépendantes. La mise en place d'une blockchain permissionnée suppose de définir un cadre de gouvernance partagé, incluant des règles d'accès, de validation et de participation.

Dans des contextes tels que la logistique internationale ou les réseaux de distribution multi-niveaux, ces questions sont particulièrement critiques. Par exemple, la définition des droits d'accès à certaines informations ou à certains modèles peut varier selon le rôle de l'acteur dans la chaîne. De même, la gestion des responsabilités en cas d'erreur ou de défaillance du système constitue un enjeu important.

L'architecture proposée apporte une réponse en structurant ces règles à travers des mécanismes de gouvernance distribuée. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite un travail préalable de définition des règles du consortium, ainsi qu'une capacité à les adapter en fonction de l'évolution des relations entre acteurs.

4.5 Contraintes opérationnelles et synchronisation des processus

Dans les chaînes d'approvisionnement, les décisions doivent souvent être prises dans des délais contraints, en réponse à des événements tels que des ruptures de stock, des retards de livraison ou des variations de la demande. L'introduction de processus distribués, tels que l'apprentissage fédéré et la validation blockchain, peut ajouter une couche de complexité.

Par exemple, la synchronisation des cycles d'apprentissage avec les cycles opérationnels constitue un enjeu clé. Un modèle de prévision mis à jour trop tard peut perdre sa pertinence, tandis qu'un processus de validation trop long peut ralentir la prise de décision.

La mise en œuvre de l'architecture nécessite donc de définir des mécanismes permettant d'adapter les cycles techniques aux contraintes opérationnelles. Cela implique notamment de trouver un équilibre entre fréquence des mises à jour, qualité des modèles et réactivité du système.

4.6 Adoption progressive dans les écosystèmes logistiques

Enfin, l'introduction d'une telle architecture dans les chaînes d'approvisionnement ne peut être envisagée de manière immédiate et globale. Elle nécessite une adoption progressive, basée sur des cas d'usage concrets.

Par exemple, des scénarios tels que la prévision collaborative de la demande, la gestion des stocks ou la détection d'anomalies logistiques peuvent constituer des points d'entrée pertinents. Ces cas d'usage permettent de démontrer la valeur de l'approche, tout en limitant les risques associés à sa mise en œuvre.

Cette démarche progressive est essentielle pour favoriser l'appropriation par les acteurs, ajuster les mécanismes de gouvernance et adapter l'architecture aux contraintes spécifiques de chaque chaîne d'approvisionnement.

5. CONCLUSION

Cet article propose une architecture conceptuelle intégrée visant à concilier collaboration inter-organisationnelle, confidentialité des données et exploitation collective de l'information dans les chaînes d'approvisionnement. En combinant une blockchain permissionnée et un mécanisme d'apprentissage fédéré, l'approche proposée répond aux limites identifiées dans la littérature, notamment en matière de confiance, de traçabilité et de gouvernance des interactions. L'originalité de cette contribution réside dans l'intégration de ces deux technologies au sein d'un cadre unifié,

reposant sur des nœuds hybrides et un mécanisme de sélection commun permettant d'optimiser simultanément les processus de validation et d'apprentissage.

Sur le plan théorique, ce travail met en évidence l'intérêt de dépasser les approches technologiques isolées au profit de modèles intégrés prenant en compte à la fois les dimensions techniques et organisationnelles des systèmes distribués. Sur le plan opérationnel, il ouvre la voie à de nouvelles formes de collaboration dans lesquelles les acteurs partagent des modèles plutôt que des données, tout en conservant le contrôle sur leurs informations sensibles.

Plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées. Une première consiste à développer une implémentation expérimentale de l'architecture afin d'évaluer ses performances dans des contextes logistiques réels. Une seconde porte sur l'amélioration du mécanisme de sélection des nœuds, notamment à travers des approches adaptatives intégrant des critères dynamiques. Une troisième concerne l'étude des mécanismes d'incitation et de gouvernance permettant de favoriser l'adoption de ce type de solution dans des environnements inter-organisationnels. Enfin, des travaux futurs pourraient analyser l'impact de cette architecture sur la performance globale des chaînes d'approvisionnement, en particulier en termes de résilience, de coordination et de prise de décision collaborative.

6. REFERENCES

A. Abboud, M.E. A. Brahmia, A. Abouaissa, A. Shahin and R. Mazraani, "A Hybrid Aggregation Approach for Federated Learning to Improve Energy Consumption in Smart Buildings," *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Marrakesh, Morocco, 2023, pp. 854-859, <https://doi.org/10.1109/IWCMC58020.2023.10183138>

A. Abboud, M.E. A. Brahmia, A. Abouaissa, A. Shahin and R. Mazraani, "A Hybrid Aggregation Approach for Federated Learning to Improve Energy Consumption in Smart Buildings," *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Marrakesh, Morocco, 2023, pp. 854-859,

<https://doi.org/10.1109/IWCMC58020.2023.10183138>

A. Abboud, M.E. A. Brahmia, A. Abouaissa, A. Shahin and R. Mazraani, "Fed-DCSRW: a privacy-preserving, dynamic client selection framework for heterogeneous federated learning via roulette wheel mechanism," *Cluster Computing*, 2026, <https://doi.org/10.1007/s10586-026-06097-7>

A.R.E.M. Baahmed, J.F. Dollinger, M.E.A. Brahmia and M. Zghal, "Hyperparameter Impact on Computational Efficiency in Federated Edge Learning," 2024 *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Ayia Napa, Cyprus, 2024, pp. 0849-0854, <https://doi.org/10.1109/IWCMC61514.2024.10592516>

Abbad, H., Souak, S., & Mahjoub, S. (2025). Internet des objets, blockchain et big data : quel(s) rôle(s) pour la prise de décision dans la supply chain automobile ?. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 39(1), 29-41. <https://doi.org/10.53102/2025.39.01.1183>

Arbaoui, M., Brahmia, M.E.A., Rahmoun, A., Zghal, M. (2024). Federated learning survey: A multi-level taxonomy of aggregation techniques, experimental insights, and future frontiers. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. <https://doi.org/10.1145/3678182>

B. Fakher, M.E.A. Brahmia, I. Bennis and A. Abouaissa, "FedCSA: A Novel Federated Learning Client Selection with Anomaly Detection Approach for IoT Systems," 2025 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Milan, Italy, 2025, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/WCNC61545.2025.10978709>

Baahmed, A.R., Dollinger, J.F., Brahmia, M.E.A., Zghal, M. (2026). HiFEL-OCKT: Hierarchical federated edge learning with objective congruence and multi-level knowledge transfer for IoT ecosystems. *Internet of Things*. Volume 36, 2026, 101868, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101868>

Barratt, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(1), 30-42. <https://doi.org/10.1108/13598540410517566>

Cao, M., & Zhang, Q. (2011). Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance. *Journal of Operations*

Management, 29(3), 163–180.
<https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.12.008>

Derrouiche, R. (2022). Supply Chain 4.0: Improving supply chains with analytics and Industry 4.0 technologies, Emel Aktas, Michael Bourlakis, Ioannis Minis, Vasileios Zeimpekis. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 36(1), 124–129.
<https://doi.org/10.53102/2022.36.01.1111>

Derrouiche, R., and S. Lamouri. 2020. "Numéro Spécial : « Supply Chain 4.0." *Logistique & Management* 28 (1): 1–3.
<https://doi.org/10.1080/12507970.2020.1718335>

ELOCK SON, C., & BREKA, J. N. . (2023). Digitalisation et industrie 4.0 au sein de la supply chain: contributions et freins. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 37(2), 55–70.
<https://doi.org/10.53102/2023.37.02.953>

Fakher, B., Brahmia, M.E.A, Bennis, I. et al. Combining client-based anomaly detection and federated learning for energy forecasting in smart buildings. *Cluster Comput* 28, 1058 (2025).
<https://doi.org/10.1007/s10586-025-05764-5>

Fakher, B., Brahmia, M.E.A., Bennis, I., & Abouaissa, A. (2025). FedWKD: Federated learning weighted aggregation with knowledge distillation for IoT forecasting. *Internet of Things*.
<https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101849>

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: Extending the supply chain resilience angles towards survivability. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904–2915.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>

K. Riahi, M.E.A Brahmia, A. Abouaissa, and L. Idoumghar. 2024. A Comparative Study of Blockchain Development Platforms. In *Proceedings of the 2023 9th International Conference on Communication and Information Processing (ICCIP '23)*.
<https://doi.org/10.1145/3638884.3638971>

K. Riahi, M.E.A. Brahmia, A. Abouaissa and L. Idoumghar, "APBFT: An Adaptive PBFT Consensus for Private Blockchains," *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 1788-1793,
<https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001568>

K. Riahi, M.E.A. Brahmia, A. Abouaissa and L. Idoumghar, "FPBFT: A Fast PBFT Protocol for Private Blockchains," 2022 9th International Conference on

Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), Milan, Italy, 2022, pp. 1-8,
<https://doi.org/10.1109/IOTSMS58070.2022.10062170>

Kairouz, P., et al. (2021). Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 14(1–2), 1–210.
<https://doi.org/10.1561/22000000083>

Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Zhu, Q. (2019). At the Nexus of Blockchain Technology, the Circular Economy, and Product Deletion. *Applied Sciences*, 9(8), 1712.
<https://doi.org/10.3390/app9081712>

Kshetri, N. (2018). Blockchain's roles in strengthening cybersecurity and protecting privacy. *Telecommunications Policy*, 42(4), 303–314.
<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.09.003>

M. Arbaoui, M.E.A. Brahmia and A. Rahmoun, "Towards secure and reliable aggregation for Federated Learning protocols in healthcare applications," *Ninth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, Paris, France, 2022.
<https://doi.org/10.1109/SDS57574.2022.10062923>

Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2020). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: A systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2063–2081.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650976>

Queiroz, M. M., Wamba, S. F. (2019). Blockchain adoption challenges in supply chain: An empirical investigation of the main drivers in India and the USA. *International Journal of Information Management*, 46, 70–82.
<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.11.021>

Riahi, K., Brahmia, M.E.A., Abouaissa, A., & Idoumghar, L. (2024). Multi-task learning for PBFT optimisation in permissioned blockchains. *Blockchain: Research and Applications*, 100206.
<https://doi.org/10.1016/j.bcra.2024.100206>

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>

1. BIOGRAPHIE

Imene BENYAHIA est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en informatique de l'Université de Batna, ainsi que d'un master en systèmes embarqués et communicants de l'Université de Haute-Alsace. Elle s'intéresse aux problèmes d'optimisation et d'aide à la décision, notamment dans le contexte de la ville intelligente et de l'industrie du futur. Elle intervient également dans plusieurs établissements en tant que vacataire, où elle assure des enseignements dans le domaine de l'informatique.



Mohamed El Amine Brahmia est enseignant-chercheur (HDR) au CESI école d'ingénieurs, sur le campus de Strasbourg. Il mène ses recherches au sein du laboratoire CESI LINEACT UR7527. Il est titulaire d'un doctorat ainsi que d'une habilitation à diriger des recherches en informatique de l'Université de Haute-Alsace. Ses travaux de recherche portent principalement sur l'intégration et la sécurisation de l'Internet des objets (IoT) et de l'intelligence artificielle collaborative dans le contexte de la ville intelligente.

¹*Imene BENYAHIA, Université de Batna,*
imene.benyahia@gmail.com

²*Mohamed El Amine BRAHMIA, CESI LINEACT UR*
7527, abrahmia@cesi.fr
<https://orcid.org/0000-0003-0114-210X>
