

Potentiel des systèmes multi-agents dans les chaînes logistiques à l'ère de l'industrie 4.0

Emmanuel Labarbe ¹

¹ MICA, Université Bordeaux Montaigne, France, emmanuel.labarbe@u-bordeaux-montaigne.fr

Résumé : Dans un contexte logistique de plus en plus complexe et incertain, les systèmes multi-agents (SMA) s'imposent comme une solution innovante pour répondre aux défis de l'Industrie 4.0. Cet article retrace l'évolution historique des SMA, depuis leurs origines dans l'intelligence artificielle distribuée des années 1970, jusqu'à leur maturité actuelle marquée par la standardisation et l'émergence de plateformes robustes. Il met en lumière la pertinence croissante des SMA pour la gestion de la chaîne logistique, grâce à leur capacité à modéliser, coordonner et optimiser des réseaux d'acteurs autonomes. À travers une revue des applications et des études de cas, l'article tente de démontrer comment les SMA offrent flexibilité, résilience et performance face aux exigences contemporaines. Enfin, il identifie les défis managériaux et les perspectives d'avenir, soulignant leur rôle clé dans la transformation digitale des organisations industrielles.

Mots clés : Systèmes multi-agents ; Logistique ; Supply chain management ; Industrie 4.0

Potential of multi-agent systems in supply chains in the era of Industry 4.0

Abstract: In an increasingly complex and uncertain logistics context, multi-agent systems (MAS) are emerging as an innovative solution to address the challenges of Industry 4.0. This article traces the historical evolution of MAS, from their origins in distributed artificial intelligence in the 1970s to their current maturity, characterized by standardization and the emergence of robust platforms. It highlights the growing relevance of MAS for supply chain management, thanks to their ability to model, coordinate, and optimize networks of autonomous actors. Through a review of applications and case studies, the article seeks to demonstrate how MAS provide flexibility, resilience, and performance in response to contemporary demands. Finally, it identifies managerial challenges and future perspectives, emphasizing their key role in the digital transformation of industrial organizations.

Keywords: Multi-agent systems; Logistics; Supply chain management; Industry 4.0

*This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article.

Citation : Labarbe E., (2026). Potentiel des systèmes multi-agents dans les chaînes logistiques à l'ère de l'industrie 4.0. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 40(X), XX-XX. <https://doi.org/10.53102/2026.40.xx.xx>

Historique : reçu le 30/06/2025, accepté le 09/07/2026, en ligne le 29/07/2026

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

Dans un contexte économique mondialisé, où la complexité et l'interconnexion s'intensifient, les entreprises logistiques recherchent en permanence des leviers d'innovation pour accroître leur efficacité et renforcer leur capacité d'adaptation face aux aléas de la chaîne d'approvisionnement. Les systèmes de gestion classiques, souvent centralisés et peu flexibles, montrent aujourd'hui leurs limites. Dès lors, les Systèmes Multi-Agents (SMA) s'imposent comme une alternative crédible.

Initialement développés dans le champ de l'intelligence artificielle distribuée, les SMA servent aujourd'hui à modéliser, simuler et piloter des systèmes complexes dans des domaines aussi variés que la logistique, la robotique ou les sciences humaines et sociales. La coopération, la coordination ou, le cas échéant, la compétition entre agents leur permettent de résoudre des problèmes complexes qu'un agent isolé ne pourrait maîtriser (Figure 1). Comparables, dans l'esprit, à la modélisation multi-agents utilisée en recherche (Bonabeau, 2002 ; Wu et al., 2024), les SMA se distinguent toutefois par une orientation résolument tournée vers l'ingénierie. Ils visent ainsi la mise en œuvre de solutions décentralisées concrètes pour le contrôle, l'automatisation et l'optimisation de processus organisationnels. Cet article retrace d'abord les grandes étapes de l'évolution des SMA, depuis leurs racines en intelligence artificielle jusqu'aux avancées technologiques récentes. Il s'attarde ensuite sur les applications et études de cas les plus marquantes dans la logistique et la chaîne d'approvisionnement. Enfin, il expose les avantages compétitifs, les défis de gouvernance et les perspectives offertes par cette approche pour le management logistique de demain.

Il convient tout d'abord d'établir une définition formelle des concepts clés. Un agent est une entité logicielle (ou physique) autonome caractérisée par quatre propriétés fondamentales (Wooldridge et Jennings, 1995) : L'autonomie (l'agent opère sans intervention humaine directe et contrôle ses propres actions et états internes), la réactivité (l'agent perçoit son environnement et y répond en temps opportun), la pro-activité (l'agent prend des initiatives et poursuit des objectifs de façon finalisée) et la socialité (l'agent interagit avec

d'autres agents par échanges de messages structurés). De manière plus large, un système multi-agents (SMA) se définit formellement comme un système composé d'un ensemble d'agents $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ évoluant dans un environnement E et d'un ensemble de relations R définissant les modes d'interactions (coopération, compétition, négociation) entre agents (Ferber, 1995). Chaque agent a_i possède un état interne s_i , un ensemble d'actions possibles Act_i , et une fonction de décision $\delta_i : \text{Perceptions} \rightarrow \text{Actions}$ (les perceptions reçues de l'environnement déterminent les actions entreprises). Le comportement global émerge des interactions locales entre agents, sans contrôle centralisé. Cette architecture distribuée confère aux SMA la flexibilité (adaptation dynamique aux perturbations), la résilience (tolérance aux pannes par redondance distribuée) et la scalabilité (ajout ou suppression d'agents sans restructuration globale du système). Ce sont trois propriétés systémiques majeures pour la logistique et la production.

Les agents communiquent via des langages de communication standardisés. Le FIPA-ACL est le standard de référence. Chaque message est structuré autour d'un performatif (Inform, request, propose, accept-proposal, reject-proposal, etc. Pour plus de détails, cf. 4.), d'un contenu sémantique et d'informations de routage. Les interactions s'organisent selon des protocoles d'interaction standardisés par la *Foundation for Intelligent Physical Agent* (FIPA). On y trouve le Contract Net Protocol (CNP) pour l'allocation de tâches par appels d'offres, les protocoles d'enchères pour les marchés multi-agents et les protocoles de requête/réponse pour la coordination bilatérale.

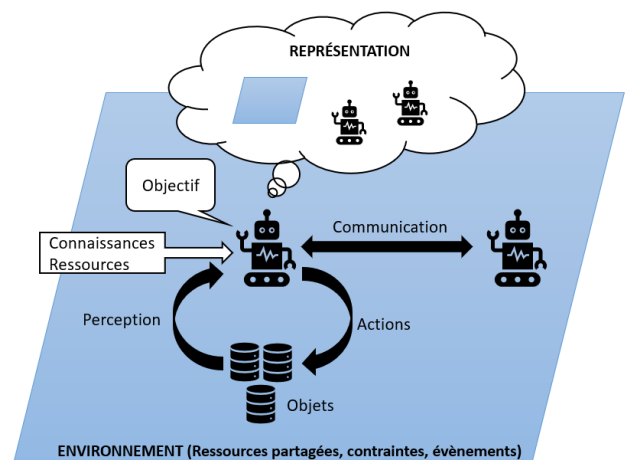


Figure 1: Représentation schématique d'un SMA (d'après Ferber, 1995) page 15.

2. PERSPECTIVE HISTORIQUE DES SYSTEMES MULTI-AGENTS

2.1 Années 1970-1990 : Les origines conceptuelles et technologiques

Les années 1970-1990 constituent une période fondatrice pour l'intelligence artificielle (IA), marquée par l'émergence des concepts clés de l'agent intelligent. L'intelligence artificielle distribuée (IAD) se développe, portée par de nouveaux paradigmes¹ permettant de concevoir des systèmes où chaque agent perçoit son environnement, prend des décisions et interagit avec d'autres agents pour résoudre collectivement des tâches complexes. Le robot Shakey (Nilsson, 1984 ; Fikes et Nilsson, 1993 ; Rajan et Saffiotti, 2017), développé dès la fin des années 1960, illustre ce cycle perception-décision-action et préfigure la collaboration distribuée entre agents.

2.2 Les débuts de l'IA et la notion d'agence

2.2.1 Le modèle de l'acteur : Vers des systèmes informatiques décentralisés

Introduit par Hewitt et al. (1973), le modèle de l'acteur propose des entités autonomes interagissant exclusivement par messages asynchrones. Il favorise modularité, évolutivité et tolérance aux pannes, et a influencé des langages comme Erlang (Armstrong, 2007), conçu pour les systèmes à haute disponibilité.

2.2.2 L'émergence et le développement de l'intelligence artificielle distribuée (IAD)

L'IAD (Bond & Gasser, 1988) s'intéresse à la coordination d'agents distribués et autonomes pour résoudre collectivement des problèmes complexes. Le Contract Net Protocol (Smith, 1980) y introduit la négociation structurée pour l'attribution dynamique des tâches, sans autorité centrale.

2.2.3 Les approches pour concevoir des agents autonomes : Entre réaction et délibération

Deux approches architecturales structurent la conception des agents autonomes. **Les architectures réactives** (Brooks, 1986, 1991) privilégient la réponse immédiate aux stimuli environnementaux, l'intelligence étant une propriété émergente. **Les architectures délibératives**, dont le modèle BDI (Rao et Georgeff,

1995), structurent l'agent autour de croyances, désirs et intentions pour planifier ses actions. Des architectures hybrides combinent aujourd'hui ces deux approches.

2.2.4 L'apport de la programmation orientée objet à la conception des SMA

L'essor de la POO (Kindler, 2007)² a fourni un modèle conceptuel naturel pour les agents comme entités autonomes combinant état et comportement et interagissant par messages, facilitant la conception des SMA.

2.3 Fin des années 1990 – années 2000 : Vers la maturation et la normalisation

Cette période a été marquée par des efforts de structuration du domaine des SMA, notamment via la standardisation des communications et la consolidation des plateformes de développement.

2.3.1 Les efforts de standardisation : L'importance de la FIPA

La FIPA, créée en 1996 (Dale et Mamdani, 2001), normalise l'interopérabilité des agents via le FIPA-ACL (structure des messages et performatifs), les protocoles d'interaction (négociation, attribution de tâches) et l'architecture des plateformes (AMS, DF), contribuant à la maturité du domaine (FIPA, 2002 ; Odell, Parunak & Bauer, 2000).

2.3.2 Les plateformes de développement : Le cas JADE

JADE (Java Agent DEvelopment Framework) implémente les normes FIPA, fournissant une infrastructure de développement intégrant communication, découverte d'agents et outils de surveillance (Bellifemine, Caire & Greenwood, 2007), et accélérant le prototypage de solutions SMA.

3. METHODOLOGIE DE LA REVUE

La présente revue de littérature s'appuie sur une recherche systématique conduite dans les bases de données Scopus et Google Scholar. Les mots clés utilisés, en français et en anglais, combinent les termes « multi-agent system », « systèmes multi-agents », « supply chain management », « logistics », « industry 4.0 », « autonomous

¹ Programmation orientée objet (POO), architecture orientée services (SOA), architecture orientée agents

² Avec Simula 67 (Dahl, 2002), Smalltalk-72 (Kay, 1996 ; Ingalls, 2020), puis C++ et Java

agents », « agent-based scheduling » et, enfin, « negotiation protocols ». La période couverte s'étend de 1970 aux développements les plus récents (2024-2025) avec une attention particulière accordée aux publications post-2015 pour les applications logistiques. Les critères d'inclusion portent sur des articles publiés dans des revues à comité de lecture ou des actes de conférences reconnues, traitant de systèmes multi-agents appliqués à la gestion de chaînes logistiques ou à des problématiques industrielles connexes, rédigée en français ou en anglais. Les travaux purement théoriques sans application logistique, ainsi que les ouvrages de vulgarisation ont été, pour la plupart, exclus. Au total, plus de 180 références ont été identifiées dont environ 77 ont été retenues. Une attention spécifique a été accordée aux études empiriques documentant des déploiements réels de SMA dans des contextes industriels, en privilégiant les travaux rapportant des métriques de performance mesurables.

4. MÉCANISMES DE COORDINATION DANS LES SMA

4.1 Protocoles de négociations classiques

La négociation entre agents constitue le mécanisme fondamental par lequel les SMA résolvent des problèmes de coordination distribuée sans autorité centrale. Trois grandes familles de protocoles de négociations sont identifiées dans la littérature.

Le Contract Net Protocol (CNP) (Smith, 1980) est le protocole de référence pour l'attribution dynamique de tâches. Son fonctionnement se déroule en quatre étapes. Un agent gestionnaire (manager) diffuse une annonce de tâche. Ensuite, les agents candidats (contractors) soumettent des offres (bids) fondées sur leurs ressources et capacités disponibles. Puis, le manager sélectionne la meilleure offre selon une fonction d'évaluation multicritère (coût, délai, qualité). Enfin, le contractor retenu exécute la tâche et rapporte le résultat.

Des extensions du CNP, comme l'Iterated Contract Net (Sandholm, 1993), permettent des cycles successifs de négociation pour améliorer les solutions tandis que les approches multi-échelon

appliquent le CNP de façon hiérarchique dans des chaînes logistiques complexes. Par exemple, Baykasoğlu et Kaplanoglu (2015) implémentent directement ce mécanisme pour la planification dynamique des chargements LTL3 avec des agents camions négociant l'attribution des lots par appels d'offre (selon leurs contraintes de capacité et d'itinéraire) en temps réel (cf. 5.2.1).

Les mécanismes d'enchères constituent une seconde famille d'algorithmes de coordination. Les enchères anglosaxonnes ascendantes (English auctions), hollandaises descendantes (Dutch auctions), à pli fermé (Sealed-bid) et les combinatoires (Combinatorial Auctions) offrent des propriétés différentes selon le contexte logistique. Les enchères combinatoires sont particulièrement adaptées à l'allocation de lots de ressources hétérogènes (créneaux de transports, capacités d'entrepôt) car elles permettent aux agents d'exprimer des préférences sur des combinaisons de ressources, dont la valeur conjointe peut dépasser la somme de leurs valeurs individuelles. Collins et al. (2002) démontrent l'efficacité de ces mécanismes dans leur environnement de test MAGNET pour la négociation de contrats logistiques avec contraintes temporelles et de précedence. Les enchères multi-attributs, où l'enchère porte non seulement sur le prix mais aussi sur des critères qualitatifs (délai, empreinte carbone), sont particulièrement pertinentes pour la sélection de fournisseurs durables (Ghadimi et al., 2017).

La négociation bilatérale et les approches basées sur la théorie des jeux permettent de gérer des négociations plus complexes entre paires d'agents aux intérêts potentiellement divergents. Ainsi, le protocole de Rubinstein (1982) à offres alternées constitue un modèle de référence pour la négociation bipartite. Des algorithmes fondés sur les équilibres de Nash sont également utilisés pour des négociations multi-parties dans les chaînes logistiques collaboratives, notamment pour la répartition équitable des gains issus de la mutualisation (Xue et al., 2023).

Gestion des conflits d'objectifs entre agents. Lorsque les objectifs locaux des agents divergent de l'optimum global du système, plusieurs mécanismes de résolution sont disponibles. Premièrement, les *mécanismes d'incitation* (incentive design) qui alignent les objectifs locaux sur l'optimum global par des récompenses ou des pénalités. Deuxièmement,

³ Mode de transport où le chargement d'un expéditeur n'occupe qu'une partie de la capacité du camion, le reste étant partagé avec d'autres expéditeurs.

les *médiateurs logiciels* qui sont des agents tiers facilitant les compromis entre parties. Troisièmement, les *approches d'optimisation multi-objectifs* qui génèrent des fronts de Pareto⁴ permettant aux agents de choisir des compromis. Enfin, les *mécanismes d'arbitrage hiérarchique*, où un agent superviseur intervient en cas de conflit persistant. Ces mécanismes sont particulièrement cruciaux dans les systèmes d'ordonnancement multi-agents, où plusieurs ressources (machines, véhicules, robots) négocient simultanément l'allocation de tâches à contraintes multiples.

4.2 Apprentissage par renforcement multi-agents (MARL)

Au-delà des protocoles à règles prédéfinies décrits supra, l'apprentissage par renforcement multi-agents (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL) constitue une famille d'approches émergentes (Busoniu et al., 2008 ; Foerster et al., 2018 ; Zhang et al., 2021) dans laquelle les agents apprennent leurs politiques de décision par essais-erreurs, en interaction continue avec l'environnement et avec les autres agents. Ainsi, chaque agent ajuste progressivement sa stratégie en fonction des récompenses reçues, sans qu'aucune règle de coordination ne soit imposée a priori. Cette approche s'avère particulièrement adaptée aux situations où la conception manuelle de protocoles serait laborieuse ou sous-optimale (e.g. ordonnancement dynamique d'ateliers flexibles, gestion collaborative d'inventaires multi-échelons, allocation adaptative de ressources logistiques). Les algorithmes de référence du domaine (MADDPG, QMIX, COMA) traitent les défis

propres au cadre multi-agents, notamment la non-stationnarité de l'environnement (qui évolue à mesure que les autres agents apprennent), l'attribution du crédit (identifier la contribution individuelle à la performance collective) et le passage à l'échelle. Le MARL ouvre ainsi la voie à des SMA capables d'améliorer continûment leur performance collective, mais il soulève des questions de stabilité, de convergence et, en contexte inter-organisationnel, de confidentialité des données nécessaires à l'apprentissage. Des questions sur lesquelles nous reviendrons en perspectives (cf. 8.2.2).

5. APPLICATIONS DES SMA DANS LA LOGISTIQUE ET LA SUPPLY CHAIN

Les SMA constituent une technologie clé pour la gestion des chaînes logistiques. En effet, leur nature distribuée se prête naturellement à une modélisation par agents autonomes qui négocient et collaborent pour optimiser coûts, délais et résilience (Lee et Kim, 2007 ; Terrada et al., 2020 ; Nitsche et al., 2023). Les tableaux 1 à 5 synthétisent les principales problématiques : coordination et optimisation (Tableau 1), transport et distribution (Tableau 2), collaboration et négociation (Tableau 3), traçabilité et sécurité (Tableau 4), logistique durable (Tableau 5).

Certaines problématiques se recoupent entre plusieurs thèmes. Elles ont donc été placées là où leur impact est central.

5.1 Coordination et optimisation de la chaîne logistique

Tableau 1 : Problématiques associées à la coordination et optimisation globale de la chaîne logistique dans le cadre des systèmes multi-agents

Problématiques associées	Références	Entreprises / Applications
5.1.1 Gestion dynamique et adaptative de la chaîne logistique		
Gestion dynamique et configuration de la chaîne d'approvisionnement	Ameri et McArthur (2013) Xu et al. (2023)	MASCOT5 A2SC (secteur de la viande)

⁴ Ensemble des meilleures solutions possibles face à plusieurs objectifs contradictoires. Aucune solution de cet ensemble ne peut être améliorée sur un critère sans se dégrader sur un autre.

⁵ Conçu pour l'identification dynamique des partenaires et la gestion coordonnée des chaînes d'approvisionnement.

Gestion dynamique et optimisée des stocks	Cheung et al. (2005) Quan et Liu (2024)	Kaz (Far East) Limited ⁶ InvAgent ⁷
Gestion multi-échelon des stocks	Liu et al. (2024)	MADRL ⁸ , HAPPO ^{9 10}
Orchestration des opérations d'entrepôt	Cheung et al. (2005) Quan et Liu (2024)	Kaz (Far East) Limited InvAgent
SMA adaptatifs pour la coordination logistique et la flexibilité de la chaîne	Wang et al. (2010) Xu et al. (2023)	A2SC (secteur de la viande) Chaîne agrumicole marocaine
Gestion des ruptures, flexibilité, amélioration des délais, réduction des stocks (adaptation dynamique)	Moutaoakil et Jamouli (2014)	
5.1.2 Prise de décision autonome, résilience et gestion des risques		
Prise de décision autonome et résilience face aux perturbations	Xu et al. (2023)	A2SC (secteur de la viande)
Gestion des risques, résilience et adaptation aux perturbations logistiques	Choi et al. (2016) Wang et al. (2010) Xu et al. (2023) Wang et al. (2021)	A2SC (secteur de la viande)
Gestion des risques de perturbation, contrôle opérationnel, gestion d'urgence, analyse des risques	Choi et al. (2016)	
5.1.3 Optimisation collaborative et réduction des inefficacités		
Réduction du risque de rupture et d'excédent de stocks	Cheung et al. (2005) Quan et Liu (2024)	Kaz (Far East) Limited InvAgent
Réduction de l'effet de fouet et des coûts totaux (coordination, négociation partage d'informations)	Saberi et al. (2012)	
Confiance et intégration des objectifs dans la chaîne d'approvisionnement		

5.1.1 Gestion dynamique et adaptative de la chaîne logistique

Dans le cadre du Digital Manufacturing Marketplace, les SMA (Ameri & McArthur, 2013) connectent automatiquement offre et demande via des ontologies sémantiques, constituant des chaînes d'approvisionnement sur mesure. De

même, les chaînes d'approvisionnement autonomes (Xu et al., 2023) exploitent les SMA pour la prise de décision prédictive, améliorant résilience et flexibilité. Pour la gestion des stocks, InvAgent (Quan & Liu, 2024) mobilise des LLM pour un apprentissage instantané minimisant ruptures et surcoûts, tandis que Cheung et al. (2005)

⁶ Kaz (Far East) Limited est une entreprise multinationale de fabrication.

⁷ Système de gestion des stocks multi-agents basé sur des grands modèles de langage pour l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement.

⁸ Algorithme d'apprentissage profond par renforcement multi-agents

⁹ Optimisation de politique proximale à agents hétérogènes

¹⁰ Des implémentations de référence sont disponibles sur GitHub : <https://github.com/xiaotianliu01/Multi-Agent-Deep-Reinforcement-Learning-on-Multi-Echelon-Inventory-Management>.

démontrent l'efficacité des SMA face à la forte variabilité de la demande.

5.1.2 Prise de décision autonome, résilience et gestion des risques

Face aux perturbations des chaînes logistiques mondiales, Wang et al. (2010) proposent un SMA capable d'intégrer ou d'exclure dynamiquement des acteurs, améliorant délais, stocks et continuité de service. Xu et al. (2023) démontrent la valeur de la prise de décision décentralisée lors de crises majeures. Dans le secteur de la viande, le système A2SC illustre les capacités prédictives des SMA. Ainsi, chaque agent ajuste en temps réel distribution, stocks et transport selon les fluctuations du marché, renforçant résilience et efficacité opérationnelle. Dans une perspective sectorielle, Moutaoakil et Jamouli (2014) proposent une modélisation multi-agents de la chaîne

agrumicole marocaine articulée à des indicateurs de suivi et d'évaluation de la performance, dans le but d'assurer une planification à la fois réactive aux perturbations et robuste face à la variabilité de la demande.

5.1.3 Optimisation collaborative et réduction des inefficacités

Saberi et al. (2012) montrent comment les SMA réduisent l'effet de fouet et les coûts totaux par coordination des stocks, partage d'informations et négociation entre fournisseurs, distributeurs et détaillants. L'approche suppose un partage honnête des données entre partenaires, condition nécessaire à l'amélioration de la coopération au sein du réseau. Liu et al. (2024) étendent ces résultats via l'apprentissage par renforcement profond multi-agents (MADRL) pour la gestion multi-échelle des stocks.

5.2 Optimisation du transport, des tournées et de la distribution

Tableau 2: Problématiques associées à l'optimisation du transport, des tournées et de la distribution dans le cadre des systèmes multi-agents

Problématiques associées	Références	Entreprises / Applications
5.2.1 Optimisation stratégique des itinéraires et de la distribution		
Optimisation des tournées de véhicules (VRP), inventaire et distribution	Serna-Urán et al. (2021) Baykasoğlu et Kaplanoğlu (2011) Baykasoğlu et Kaplanoğlu (2015) Luo (2024)	MABLCS ¹¹ MABDLCS ¹²
Consolidation des charges et planification des itinéraires	Baykasoğlu et Kaplanoğlu (2011)	MABLCS
Réduction des délais coûts (distribution alimentaire)	Algasse et al. (2016)	PME en Arabie Saoudite
Optimisation logistique portuaire et planification stratégique des terminaux intermodaux	Muravev et al. (2021)	ABSDS model ¹³ , ABDES model ¹⁴ Port de Ningbo-Zhoushan
5.2.2 Adaptation dynamique et réactivité opérationnelle		
Planification dynamique des chargements (négociation)	Baykasoğlu et Kaplanoğlu (2015)	MABDLCS
Ajustements en temps réel (trafic, météo, etc.)	Luo (2024)	

¹¹ Système de consolidation de charge basé sur des agents multiples

¹² Système de contrôle dynamique des charges/camions basé sur des agents multiples

¹³ Agent-based system dynamics simulation model

¹⁴ Agent-based discrete event simulation model

Aide à la décision pour l’attribution des ordres de transport en temps réel	Arendt et al. (2016)	AMATRAK SMA STUTE Logistics ¹⁵
Expédition autonome et coordination efficace des services de transport (réseaux logistiques complexes)		
5.2.3 Synergies collaboratives et technologies embarquées		
Logistique du dernier kilomètre, suivi en temps réel, collaboration via RFID	Khayyat et al. (2016)	
Transport collaboratif d’objets en entrepôt, coordination d’agents hétérogènes, apprentissage hiérarchique	Hasan et al. (2024)	

5.2.1 Optimisation stratégique des itinéraires et de la distribution

Serna-Urán et al. (2021) proposent un SMA pour l'optimisation de l'inventaire partagé et l'attribution d'itinéraires via heuristiques locales, réduisant coûts de distribution et distance totale parcourue. Baykasoğlu et Kaplanoglu (2015) développent un système de planification dynamique des chargements LTL par négociation entre agents-camions, générant des plannings en temps réel. Algassem et al. (2016), dans une PME alimentaire en Arabie Saoudite, obtiennent une réduction du temps de cycle de 1 380 à 145 minutes (facteur 9,5) grâce aux SMA. Muravev et al. (2021) optimisent les terminaux intermodaux via simulation hybride, validée sur le port de Ningbo-Zhoushan.

5.2.2 Adaptation dynamique et réactivité opérationnelle

Arendt et al. (2016) développent un système d'aide à la décision multi-agents pour l'attribution en temps réel des ordres de transport, tenant compte

de la complexité des marchés dynamiques et des différentes tailles d'expéditions au sein de STUTE Logistics. Luo (2024) intègre des ajustements en temps réel basés sur le trafic, la météo et le volume pour optimiser les tournées de livraison express.

5.2.3 Synergies collaboratives et technologies embarquées

Khayyat et al. (2016) proposent un SMA intégrant la technologie RFID, composé de six agents autonomes (détaillant, fournisseur, transporteur, réseau, administrateur, RFIDG), pour améliorer la logistique collaborative du dernier kilomètre et réduire congestion et pollution. Hasan et al. (2024) démontrent l'efficacité du transport collaboratif d'objets en entrepôt par agents hétérogènes, via apprentissage hiérarchique combinant évaluation globale et curiosité intrinsèque.

5.3 Collaboration, négociation et prise de décision décentralisée

Tableau 3 Problématiques associées à la collaboration, négociation et prise de décision décentralisée dans le cadre des systèmes multi-agents

Problématiques associées	Références	Entreprises / Applications
5.3.1 Coordination stratégique inter-organisationnelle		
Coordination inter-organisationnelle et collaboration	Anane et al. (2009) Dachry et al. (2013)	Secteur de l'aviation

¹⁵ Prestataire de services logistiques disposant de plusieurs agences dans toute l'Allemagne

		British Telecom, Communication Technologies (Japon), Fujitsu Laboratories of America Capgemini (2024) P&G (2024) Walmart (2025)
Application de la théorie des jeux à la collaboration fournisseurs-transporteurs et gestion d'entrepôts	Khayyat et al. (2016) Xue et al. (2023)	
5.3.2 Automatisation des mécanismes de négociation		
Automatisation des négociations, marchés numériques et enchères	Collins et al. (2002) Huhns & Stephens (2001) Ströbel & Weinhardt (2003)	MAGNET, Domaine viticole
5.3.3 Optimisation opérationnelle dynamique		
Ordonnancement et coordination dynamique des opérations industrielles	Tsai & Chen (2008) Sakr et al. (2021)	Secteur des semi-conducteurs

5.3.1 Coordination stratégique inter-organisationnelle

Selon Capgemini (2024), 18 % des organisations ont activé des capacités agents dans certaines fonctions. Walmart (2025) et P&G (2024) transitionnent vers des systèmes hybrides intégrant des agents autonomes dans leurs portails B2B. Anane et al. (2009) proposent une approche coalition pour modéliser la coordination inter-organisationnelle. Dachry et al. (2013) présentent une architecture SMA collaborative pour le partage en temps réel entre parties prenantes. La théorie des jeux, intégrée aux SMA, optimise la collaboration logistique. Elle modélise la coordination fournisseurs-transporteurs (Khayyat et al., 2016) et réduit le temps d'exécution des AGV en entrepôt par rapport aux méthodes conventionnelles (Xue et al., 2023).

5.3.2 Automatisation des mécanismes de négociation

L'automatisation des négociations est un apport majeur des SMA pour la gestion collaborative des

achats. Des agents représentant différentes entreprises échangent des propositions selon stratégies prédéfinies, conditions du marché et contraintes internes. MAGNET (Collins et al., 2002) a formalisé ces protocoles ; GE et Siemens les intègrent partiellement dans leurs plateformes d'approvisionnement (demandes de devis, enchères inversées). Ces mécanismes accélèrent la réactivité face au marché (Huhns & Stephens, 2001 ; Ströbel & Weinhardt, 2003) et soutiennent des partenariats plus stratégiques.

5.3.3 Optimisation opérationnelle dynamique

Dans les environnements industriels complexes tels que la fabrication de semi-conducteurs (Tsai & Chen, 2008 ; Sakr et al., 2021), les SMA permettent l'allocation dynamique des lots aux machines, le réacheminement en cas d'incident et l'optimisation du débit global, grâce à la prise de décision décentralisée.

5.4 Traçabilité, visibilité, gestion de l'information et sécurité

Tableau 4 : Problématiques associées à la traçabilité, visibilité, gestion de l'information et sécurité dans le cadre des systèmes multi-agents

Problématiques associées	Références	Entreprises / Applications
5.4.1 Traçabilité et visibilité en temps réel		
Visibilité, traçabilité sur la chaîne logistique	Xia et al. (2023)	Lenovo
5.4.2 Automatisation, conformité et gestion intelligente via SMA et blockchain		
SMA et blockchain, automatisation et conformité via contrats intelligents	Calvaresi et al. (2018) Lesueur et al. (2022) Mezquita et al. (2021) Xia et al. (2023)	Secteur pharmaceutique Lenovo

5.4.1 Traçabilité et visibilité en temps réel

Les plateformes de visibilité de la supply chain, comme celle déployée par Lenovo (Xia et al., 2023), offrent une visibilité partagée en temps réel, automatisent l'agrégation des données et la détection d'exceptions. Bien que l'intervention humaine demeure centrale, leur automatisation croissante les rapproche d'une logique multi-agents (Orlikowski, 1992 ; Williamson, 1985).

5.4.2 Automatisation, conformité et gestion intelligente via SMA et blockchain

L'intégration blockchain-SMA ouvre de nouvelles perspectives. Ainsi, Calvaresi et al. (2018), à travers une revue systématique de la littérature, établissent la complémentarité fondamentale entre SMA et blockchain. Les SMA assurent la coordination dynamique entre acteurs distribués tandis que la blockchain garantit l'immutabilité et la traçabilité des transactions, deux propriétés essentielles pour les chaînes logistiques multi-partenaires. Dans une

perspective prospective, Lesueur et al. (2022) identifient trois familles d'usages majeurs de la blockchain pour la logistique et le SCM (traçabilité amont/aval, exécution automatisée via contrats intelligents et sécurisation des échanges inter-organisationnels) qui recoupent directement les fonctions attendues des SMA distribués. Dans le secteur pharmaceutique, Mezquita et al. (2021) utilisent des contrats intelligents pour automatiser les activités logistiques, supprimer les intermédiaires et garantir la conformité réglementaire. Le même principe est appliqué par Lenovo dans l'électronique (Xia et al., 2023), accélérant les processus et renforçant sécurité et transparence.

5.5 Logistique durable, économie circulaire et logistique inverse

Tableau 5 : Problématiques associées à la logistique durable, économie circulaire et logistique inverse dans le cadre des systèmes multi-agents

Problématiques associées	Références	Entreprises / Applications
5.5.1 Logistique inverse et économie circulaire		
Fondements théoriques des supplys		
Optimisation de la logistique inverse, gestion des déchets, recyclage et économie circulaire	Mishra et al. (2012)	

Gestion des processus de logistique inverse	Lhafiane et al. (2015)	Méthodologie Prometheus ¹⁶
5.5.2 Logistique durable et optimisation environnementale		
Cadrage théorique des fondements des supply chains durables	Govindan et al. (2024)	
Logistique durable : Améliore la collaboration, réduit les émissions de carbone et optimise l'allocation des ressources	Li et al. (2023) Xu et al. (2023a) Xu et al. (2023b)	
Décision autonome, communication et coordination pour la logistique durable	Mishra et al. (2012)	
5.5.3 Circularité, diffusion et durabilité produit-service		
Economie circulaire : diffusion des produits et des services, la circularité et évaluation de la durabilité	Rizzati et Landoni, (2024)	
5.5.4 Automatisation durable et sélection fournisseurs		
Efficacité logistique en automatisant les processus durables de sélection des fournisseurs et d'attribution des commandes	Ghadimi et al. (2017)	Secteur de l'électronique pour l'industrie des dispositifs médicaux

5.5.1 Logistique inverse et économie circulaire

Mishra et al. (2012) proposent une architecture multi-agents pour la logistique inverse, gérant classification, recyclage et réutilisation de manière autonome, réduisant les coûts et améliorant l'utilisation des ressources en fabrication. De leur côté, Lhafiane et al. (2015) utilisent la méthodologie Prometheus pour structurer les agents selon des rôles spécifiques : contrôle, collecte, tri, traitement et élimination, couvrant l'ensemble des processus de retour et de remise à neuf dans le secteur du e-commerce.

5.5.2 Logistique durable et optimisation environnementale

Les SMA contribuent à la réduction de l'empreinte environnementale des chaînes logistiques par plusieurs leviers. Ainsi, Govindan et al. (2024), dans une revue systématique des fondements théoriques des supply chains durables, soulignent que la coordination inter-organisationnelle et le partage

d'informations constituent des leviers essentiels de la durabilité. Les SMA permettent précisément de formaliser et d'opérationnaliser à grande échelle ces deux dimensions. Par exemple, dans la logistique collaborative, les SMA améliorent le taux de remplissage des camions et minimisent les distances parcourues, réduisant ainsi les émissions de carbone (Xu et al., 2023b). Li et al. (2023) montrent l'apport des SMA pour les réseaux de transport hyperconnectés dans le cadre de l'Internet Physique, optimisant l'allocation des ressources à l'échelle du réseau. L'intégration de jumeaux numériques permet par ailleurs de créer une réplique numérique de l'environnement physique pour simuler et réduire l'impact environnemental des opérations avant leur déploiement (Xu et al., 2023a)(cf. 8.2.1).

5.5.3 Circularité, diffusion et durabilité produit-service

Rizzati et Landoni (2024), à travers une revue systématique de la modélisation agent en économie

¹⁶ Méthodologie de développement SMA (Padgham et Winikoff, 2002) guidant la conception de manière structurée, itérative et indépendante de la plateforme.

circulaire, montrent que les SMA constituent l'outil de modélisation le mieux adapté pour simuler les dynamiques de circularité (diffusion des pratiques, interactions entre acteurs hétérogènes, évaluation de la durabilité) à des échelles macro-économiques, les modèles traditionnels ne permettant pas de capturer. Cette perspective ouvre la voie à des chaînes logistiques conçues dès l'origine pour la circularité, intégrant retour, reconfiguration et réutilisation comme paramètres de décision à part entière.

5.5.4 Automatisation durable et sélection fournisseurs

Ghadimi et al. (2017) démontrent comment les SMA améliorent l'efficacité logistique en automatisant les processus de sélection durable des fournisseurs et d'attribution des commandes dans un partenariat de supply chain. Les agents intègrent simultanément les dimensions environnementales, économiques et sociales dans leurs décisions d'approvisionnement, facilitant une communication structurée et un échange d'informations normalisé entre partenaires. Cette approche aboutit à des avantages concurrentiels durables et à des partenariats long terme, illustrant le rôle des SMA dans la concrétisation des objectifs de développement durable.

6. DEPLOIEMENTS ET APPORTS INDUSTRIELS

6.1 Applications sectorielles concrètes

Les SMA ont fait l'objet de déploiements industriels documentés dans plusieurs secteurs clés. Dans l'industrie automobile, des systèmes multi-agents pilotent l'ordonnancement des lignes d'assemblage et la gestion des fournisseurs en temps réel (Lee et Kim, 2007). Mykoniatis et Katsigiannis (2025) démontrent comment des agents représentant les postes de travail, robots et opérateurs humains interagissent avec un jumeau numérique de la chaîne de production pour optimiser les allocations de tâches en temps réel.

Dans la grande distribution, la chaîne Dm-drogerie markt a déployé des jumeaux numériques de

chacun de ses 2 000 magasins couplés à des agents de réapprovisionnement automatique (DHL, 2024). De son côté, Lenovo (Xia et al., 2023) illustre l'intégration des SMA pour la traçabilité et la visibilité en temps réel de l'ensemble de la chaîne électronique. Dans le secteur pharmaceutique, un SMA basé sur la blockchain automatise et sécurise les activités logistiques via des contrats intelligents (Mezquita et al., 2021), garantissant la conformité réglementaire et éliminant les intermédiaires.

Enfin, dans l'industrie des semi-conducteurs, Tsai et Chen (2008) et Sakr et al. (2021) montrent comment les SMA permettent l'allocation dynamique des lots aux machines et le réacheminement des tâches en cas d'incident, améliorant significativement le débit global.

6.2 Systèmes multi-agents flexibles et configurables (FC-MAS)

Une catégorie spécifique de SMA, les systèmes multi-agents flexibles et configurables¹⁷, mérite une attention particulière dans le contexte industriel. Contrairement aux SMA à architecture fixée, les FC-MAS permettent une reconfiguration dynamique à chaud de leur structure (e.g., ajout ou suppression d'agents à chaud, modification des règles de négociation et des protocoles d'interaction, réattribution des rôles entre agents selon les besoins opérationnels). Cette propriété de configurabilité est essentielle dans les chaînes de production et de logistique où la structure du réseau évolue fréquemment (e.g., entrées et sorties de partenaires, variations saisonnières de capacité, événements perturbateurs). Les FC-MAS sont notamment mis en œuvre dans des systèmes de production holoniques (Holon Manufacturing Systems, HMS), où les holons ressources peuvent être reconfigurés dynamiquement pour s'adapter à de nouvelles gammes de produits ou à des modifications du layout industriel. Un défi majeur de ces systèmes réside dans la garantie de la stabilité du comportement collectif lors des reconfigurations, nécessitant des mécanismes de coordination spécifiques (protocoles de handover,

¹⁷ Flexible Configurable MAS, FC-MAS)

mécanismes de consensus) pour éviter les instabilités transitoires.

6.3 Le cas du framework SCEP et ses dérivés (RAMSES, SCEMP, SCEMPT)

Le framework SCEP (Supply Chain Event Protocol), développé par Monostori et al. (2006) dans le cadre du projet européen PROMISE, représente une contribution majeure à la littérature sur l'ordonnancement SMA dans les systèmes industriels complexes. SCEP est un protocole de négociation multi-agents spécifiquement conçu pour l'allocation dynamique des tâches et la négociation en temps réel dans des ateliers de fabrication distribués. Son principe fondamental repose sur une architecture holonique. Chaque ressource (machine, robot, véhicule) est représentée par un agent holon qui négocie bilatéralement ou en réseau avec d'autres holons pour s'allouer des opérations.

Trois variantes dérivées de SCEP ont été proposées dans la littérature pour étendre ses capacités. Premièrement, **RAMSES** (Reactive and Adaptive Multi-agent Scheduling and Execution System) intègre des mécanismes de replanification réactive permettant de gérer les perturbations en temps réel (pannes machines, urgences de commandes, variations de qualité). Les agents RAMSES maintiennent un modèle probabiliste des perturbations pour anticiper les conflits d'allocation et déclencher proactivement des rencontres de renégociation. Deuxièmement, **SCEMP** (Supply Chain Event Management Protocol) étend SCEP au niveau de la chaîne logistique étendue, en gérant les événements inter-organisationnels (retards de livraison fournisseurs, ruptures de stock aval, variations de la demande). SCEMP utilise un mécanisme d'escalade hiérarchique. Les événements sont d'abord traités localement par les agents concernés, et ne remontent au niveau supérieur qu'en cas d'impossibilité de résolution locale. Enfin, **SCEMPT** (Supply Chain Event Management Protocol with Transportation) enrichit SCEMP en intégrant explicitement la dimension transport dans la négociation multi-agents. Les agents transport et les agents production négocient conjointement les calendriers d'approvisionnement et d'expédition, permettant une optimisation simultanée des flux physiques et des calendriers de production.

En termes de performance, les expériences réalisées avec ces frameworks sur des systèmes de fabrication réels et simulés ont montré des gains significatifs. Ainsi, RAMSES a démontré une réduction de 15 à 30 % du temps de cycle en conditions perturbées par rapport à des ordonnanceurs classiques centralisés, tandis que SCEMP a permis de réduire les ruptures de stock inter-échelons de 20 à 40 % dans des chaînes logistiques simulées de 5 à 10 acteurs. Ces résultats s'expliquent par la capacité des agents à réagir localement aux perturbations sans attendre une décision centralisée, réduisant considérablement le temps de réponse du système global. Ces frameworks illustrent concrètement comment les SMA peuvent être déployés dans des systèmes industriels réels, avec des métriques de performance mesurables et des mécanismes de négociation bien définis (cf. 6.4).

6.4 Métriques de performance pour évaluer les SMA industriels

L'évaluation rigoureuse des SMA industriels nécessite un cadre de métriques adapté, intégrant des dimensions techniques, opérationnelles et économiques. Quatre grandes catégories de métriques sont identifiées dans la littérature. Premièrement, les **métriques de performance opérationnelle**. Elles comprennent la durée totale d'exécution d'un ensemble de tâches, le taux de service (proportion des commandes livrées dans les délais), le taux d'utilisation des ressources et le temps de réponse aux perturbations. Ces indicateurs quantifient l'efficacité opérationnelle du SMA en conditions normales et perturbées. Par exemple, la simulation de Algasse et al. (2016) rapporte une réduction du temps de cycle de 1 380 minutes à 145 minutes, soit un facteur d'amélioration de 9,5, tandis que la mise à jour en temps réel du système RFID de Khayat et al. (2016) permet une réduction des erreurs de livraison de l'ordre de 40 %. Deuxièmement, les **métriques de résilience**. Elles comprennent le temps de détection des perturbations, le temps de récupération (Time-to-Recover, TTR), la profondeur de la dégradation de performance lors d'un événement disruptif, et la robustesse mesurée par la variance de performance sur un ensemble de scénarios test. Troisièmement,

les **métriques de scalabilité et de qualité de la négociation**. Elles comprennent le temps de convergence des négociations, le nombre de rounds nécessaires pour atteindre un accord, le ratio de solutions Pareto-optimales obtenues, et l'écart à l'optimum global (solution centralisée de référence). Ces métriques sont essentielles pour comparer l'efficacité des différents protocoles de négociation. Enfin, les **métriques économiques** et de coût total. Elles comprennent le coût total de possession du SMA (Total Cost of Ownership, TCO). Cela inclut le développement, le déploiement et la maintenance, le retour sur investissement (ROI) basé sur les gains opérationnels, et la réduction des coûts logistiques totaux par rapport à la solution de référence. L'absence systématique de ces métriques dans la littérature constitue une limite importante, soulignée notamment par Nitsche et al. (2023), qui rend difficile la comparaison des approches et freine l'adoption industrielle des SMA faute de démonstrations quantifiées du retour sur investissement.

7. ANALYSE CRITIQUE ET ENJEUX ETHIQUES

L'adoption des Systèmes Multi-Agents (SMA) dans les organisations, et plus particulièrement en logistique et gestion industrielle, soulève un certain nombre de défis et de questions critiques qui méritent une attention particulière. Au-delà des avantages technologiques et opérationnels, il est crucial d'analyser les implications managériales, organisationnelles et éthiques de ces systèmes.

7.1 Comparaison des SMA avec d'autres approches de gestion de la chaîne logistique

Pour justifier le recours aux SMA dans la gestion des chaînes logistiques, il est nécessaire de les situer par rapport aux autres approches disponibles. Quatre grandes catégories de modèles peuvent être comparées aux SMA : **les systèmes centralisés classiques** (ERP/APS), **les approches d'optimisation opérationnelle** (recherche opérationnelle, algorithmes génétiques), **les systèmes de simulation** (simulation à événements discrets, systèmes dynamiques) et **les approches basées sur l'apprentissage automatique** (Machine Learning, Deep Learning). Les systèmes centralisés de type ERP/APS offrent une vision intégrée de la chaîne logistique et s'appuient sur des plans optimisés

calculés hors ligne. Cependant, ils manquent de réactivité face aux perturbations en temps réel et supposent une centralisation de l'information que les chaînes inter-organisationnelles ne permettent pas toujours. Les approches d'optimisation opérationnelle (programmation linéaire, algorithmes métaheuristiques) produisent des solutions de haute qualité pour des problèmes bien définis. Mais leur rigidité structurelle les rend peu adaptées à des environnements dynamiques et distribués où les contraintes évoluent en continu (Davidsson et al., 2005). La simulation à événements discrets permet quant à elle d'analyser le comportement d'un système. Cependant, elle ne pilote pas ce dernier en conditions réelles. Elle reste essentiellement un outil d'aide à la décision *ex ante*. Enfin, les approches de Machine Learning et de Deep Reinforcement Learning, en plein essor, permettent des prises de décision adaptatives. Néanmoins, elles souffrent souvent d'un manque d'interprétabilité et nécessitent d'importants volumes de données d'entraînement.

Face à ces alternatives, les SMA se distinguent par trois propriétés différenciantes. D'abord, leur architecture décentralisée élimine le point de défaillance unique et permet une prise de décision distribuée chez des acteurs autonomes n'ayant pas à partager l'ensemble de leurs données internes (propriété essentielle dans les chaînes inter-organisationnelles). Ensuite, leur capacité de reconfiguration dynamique leur permet d'intégrer ou d'exclure des participants en cours d'exécution sans arrêt du système, contrairement aux systèmes centralisés qui nécessitent un redémarrage. Enfin, ils permettent la modélisation explicite des protocoles de négociation, ce qui autorise une traçabilité et une auditabilité des décisions collectives. C'est un avantage que les approches de type boîte noire (deep learning) ne possèdent pas. Néanmoins, ce choix implique des contreparties. En effet, les SMA sont généralement moins performants que les solveurs d'optimisation centralisés sur des problèmes statiques bien définis, et leur développement reste plus coûteux que des solutions standardisées. Le choix des SMA se justifie donc principalement dans des contextes caractérisés par un haut degré de distribution, d'incertitude, de dynamisme et d'autonomie des acteurs (propriétés intrinsèques aux chaînes logistiques contemporaines).

7.2 Défis managériaux et organisationnels

La littérature met en évidence plusieurs défis et limites connues des SMA.

L'un des principaux défis réside dans la complexité de conception et de mise en œuvre des SMA. Définir les comportements des agents, leurs modes d'interaction et de coordination, ainsi que les mécanismes de négociation et de résolution de conflits nécessite une expertise pointue (Nitsche et al., 2023), à la fois en informatique et dans le domaine d'application (ici, la logistique et gestion industrielle). Cette exigence d'expertise s'inscrit dans un ensemble plus large de freins à l'adoption des technologies de l'Industrie 4.0 dans les supply chains (manque de compétences numériques, absence de directives sectorielles, faible engagement des directions) identifiés par Elock Son et Breka (2023) au terme d'une revue systématique dédiée.

La validation et le test de systèmes aussi complexes et dynamiques sont également des tâches ardues. Pour les gestionnaires, cela implique des investissements importants en R&D ou dans l'acquisition de solutions éprouvées, ainsi que dans la formation des équipes. À cette complexité intrinsèque s'ajoute la question de l'intégration des SMA dans les systèmes d'information existants (ERP, WMS, TMS), un enjeu technique et organisationnel majeur. Les entreprises ont souvent des infrastructures informatiques hétérogènes. Or, du fait de l'absence de standards universellement adoptés (Hellingrath et Böhle, 2010), assurer l'interopérabilité et la cohérence des données entre les SMA et ces systèmes existants peut s'avérer coûteux et complexe, exposant les organisations à des risques de fragmentation de leurs infrastructures et à des difficultés de conformité réglementaire.

Troisièmement, le passage à l'échelle (scalabilité) peut générer des problèmes de performance liés à l'explosion combinatoire des interactions dans de très grands réseaux logistiques.

Au-delà des aspects technologiques, la réussite de l'implémentation des SMA dépend fortement de la gestion du changement au sein des organisations. Comme l'a montré Rosenberg (1982), la diffusion d'une innovation technologique procède moins d'une rupture instantanée que d'un processus d'apprentissage progressif et d'adaptation mutuelle entre la technologie et les pratiques productives qui

l'accueillent. L'introduction de SMA peut modifier en profondeur les processus de travail, les rôles et les responsabilités des employés. Par exemple, dans un entrepôt intelligent où des robots-agents collaborent avec des opérateurs humains, il est nécessaire de redéfinir les tâches, de former le personnel à interagir avec ces nouvelles technologies et de surmonter les éventuelles résistances au changement. Une approche participative et une communication transparente sont essentielles pour faciliter l'acceptation et l'appropriation de ces systèmes. La question de la gouvernance des SMA vient également complexifier leur déploiement, notamment en matière de responsabilité et de supervision. Qui est responsable en cas de décision erronée prise par un agent ou un collectif d'agents ? Comment s'assurer que les objectifs locaux des agents convergent vers l'optimum global de l'organisation ? La décentralisation inhérente aux SMA peut rendre le contrôle et la supervision plus difficiles. Il est donc nécessaire de mettre en place des mécanismes de surveillance, d'audit et de régulation adaptés, sans pour autant brider l'autonomie et la flexibilité qui font la force de ces systèmes.

Enfin, la confiance et la sécurité restent des enjeux centraux, en particulier dans le contexte logistique où la collaboration inter-entreprises est essentielle. Tout particulièrement lorsque des agents logiciels partagent des informations sensibles (e.g., niveaux de stocks, coûts, capacités) et prennent des décisions conjointes. Les questions de sécurité des données, de confidentialité et de propriété intellectuelle doivent être soigneusement adressées.

D'autres défis identifiés par Nitsche et al. (2023) incluent la maturité technologique parfois insuffisante, les coûts élevés de développement et de mise en œuvre (surtout pour les PME), et la disponibilité limitée de cas d'utilisation réels et d'exemples de réussite documentés qui peuvent freiner l'adoption.

7.3 Enjeux éthiques

L'utilisation croissante des SMA, notamment ceux dotés de capacités d'apprentissage et de décision autonome, soulève d'importants enjeux éthiques.

Au premier plan de ces préoccupations, la question de la responsabilité demeure centrale. Si un SMA optimisant les livraisons du dernier kilomètre cause un accident ou discrimine certains clients en fonction de critères non éthiques appris de manière

autonome, qui est responsable ? Le concepteur du système, l'entreprise qui l'utilise, ou l'agent lui-même ? Définir des cadres juridiques et éthiques clairs pour encadrer la responsabilité des systèmes autonomes est un défi majeur.

Parallèlement, la transparence et l'explicabilité des décisions prises par les SMA (souvent qualifiées de « boîte noire » lorsque basées sur des algorithmes d'apprentissage profond complexes) représentent également des enjeux cruciaux pour les organisations. Les gestionnaires et les utilisateurs doivent pouvoir comprendre pourquoi un système a pris une décision particulière, notamment lorsqu'elle a des conséquences significatives. Cela est particulièrement vrai en logistique si, par exemple, un SMA décide de ne plus desservir une zone géographique jugée non rentable, avec des conséquences sociales potentielles. De plus, les risques de biais algorithmiques doivent être anticipés et maîtrisés afin d'éviter la reproduction ou l'amplification d'inégalités existantes. Si les données utilisées pour entraîner les agents comportent des biais (historiques de discrimination, par exemple), les SMA peuvent reproduire et amplifier ces biais dans leurs décisions. Par exemple, un SMA d'affectation de ressources logistiques pourrait involontairement défavoriser certaines régions ou certains types de fournisseurs si les données d'apprentissage reflètent des inégalités passées. Des audits réguliers et des méthodes de détection et de correction des biais sont nécessaires.

Enfin, la question de la vie privée des employés (suivi des performances des opérateurs dans un entrepôt) ou des clients (suivi des habitudes de consommation pour optimiser les livraisons) et de la protection des données personnelles s'impose comme un enjeu incontournable dans l'usage des SMA. Il est impératif de respecter les réglementations en matière de protection des données (comme le RGPD en Europe) et de garantir une utilisation éthique des informations collectées. Aborder ces défis managériaux, organisationnels et éthiques est indispensable pour assurer un déploiement responsable et bénéfique des SMA dans les organisations et, plus spécifiquement, dans le secteur stratégique de la logistique.

8. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) marquent une avancée notable par rapport aux approches

informatiques classiques, apportant flexibilité et adaptabilité à la gestion des systèmes complexes et distribués, en particulier dans le management industriel et logistique. Cet article a retracé l'évolution des SMA, de leurs fondements à leurs applications concrètes, notamment dans la chaîne d'approvisionnement. Leur capacité à modéliser et optimiser des processus impliquant de multiples acteurs autonomes favorise l'efficacité, la résilience et l'agilité des chaînes de valeur, comme l'illustrent divers exemples : configuration autonome, optimisation des transports, gestion intelligente des entrepôts, logistique du dernier kilomètre, traçabilité, gestion des risques et logistique durable. Cependant, leur déploiement soulève des défis techniques, organisationnels et éthiques, notamment en matière d'intégration, de coûts et de responsabilité, qui nécessitent une attention particulière de la part des managers et chercheurs. La recherche en management doit accompagner ces évolutions pour garantir une adoption responsable. Enfin, les perspectives sont prometteuses, avec la synthèse SMA-DT-MARL, l'intégration croissante des SMA à l'Internet des Objets, à la blockchain (Mezquita et al., 2021), au Big Data et à l'intelligence artificielle avancée (Nitsche et al., 2023 ; Quan & Liu, 2024), ouvrant la voie à des chaînes logistiques toujours plus autonomes et intelligentes.

8.1 Cadre de synthèse : composantes clés et apports de la littérature recensée

Bien que cet article ne propose pas un nouveau modèle SMA mais une revue systématique de la littérature, la mise en regard des travaux recensés permet de dégager une architecture-type récurrente, articulée autour de quatre composantes complémentaires que les travaux individuels mobilisent rarement de manière conjointe.

Ainsi, la revue conduite met en évidence quatre composantes architecturales qui structurent de façon récurrente les SMA logistiques recensés dans la littérature. La première est une couche d'agents métiers spécialisés : chaque entité de la chaîne (fournisseur, transporteur, entrepôt, client) est généralement représentée par un agent BDI (Belief-Desire-Intention) doté d'un modèle de connaissance propre, de buts opérationnels et d'une fonction de

décision locale. La deuxième est une couche de protocoles de négociation structurés, où la coordination s'opère via le Contract Net Protocol (CNP), des mécanismes d'enchères et des protocoles bilatéraux selon la nature de la problématique. La troisième est une couche de supervision et de résilience, dans laquelle des agents moniteurs détectent les perturbations et déclenchent renégociation ou reconfiguration dynamique du réseau. La quatrième est une couche d'interopérabilité conforme aux standards FIPA, permettant l'intégration avec les systèmes hétérogènes existants (ERP, WMS, IoT). Cette articulation, rarement explicitée comme telle dans les travaux individuels, ressort de la mise en regard transversale des architectures recensées.

Au-delà de cette mise en perspective architecturale, la revue apporte trois contributions à la littérature existante. Premièrement, elle articule sur un même plan des dimensions habituellement traitées séparément (fondements historiques, mécanismes de coordination, applications sectorielles, défis managériaux et enjeux éthiques) facilitant ainsi pour le lecteur une lecture intégrée du champ. Deuxièmement, elle cartographie les métriques de performance disséminées dans des études isolées (cf. section 5.5), permettant d'apprécier la valeur opérationnelle des SMA sur des bases comparables. Troisièmement, elle inclut les développements les plus récents [agents LLM (Quan & Liu, 2024 ; Jannelli et al., 2025), MARL préservant la confidentialité (Zhang et al., 2024), couplage SMA-jumeaux numériques (Mykoniatis et Katsigiannis, 2025)] qui n'avaient pas encore été intégrés aux synthèses antérieures. Ces apports visent à offrir aux chercheurs un cadre de lecture du champ et aux praticiens un repère pour évaluer la pertinence des SMA dans leur contexte industriel.

8.2. Perspectives

8.2.1 Avec les SMA et les jumeaux numériques, des chaînes logistiques auto-apprenantes

L'intégration des SMA avec les jumeaux numériques (Digital Twins, DT) constitue l'une des tendances les plus prometteuses et les moins explorées dans la

littérature existante sur les SMA logistiques. Un jumeau numérique est une réplique virtuelle et dynamique d'un système physique¹⁸ synchronisée en temps réel par des capteurs IoT et des flux de données opérationnelles. Couplés à des agents intelligents, les jumeaux numériques offrent un environnement d'exécution et de simulation continu dans lequel les agents peuvent à la fois agir sur le système physique et simuler des scénarios contrefactuels avant de déployer une décision. Le marché mondial des jumeaux numériques en logistique, évalué à 12,8 milliards de dollars en 2024, affiche un taux de croissance annuel supérieur à 40% et pourrait atteindre 240 milliards de dollars d'ici 2035 (DHL, 2024), signe d'une adoption industrielle en forte accélération.

Sur le plan conceptuel, la convergence SMA-DT ouvre la voie à des chaînes logistiques auto-apprenantes. Ainsi, le jumeau numérique fournit un environnement de simulation continu dans lequel les agents peuvent tester de nouvelles stratégies de négociation ou d'allocation sans risque pour les opérations réelles, puis déployer les politiques les plus performantes sur le système physique. Cette boucle « simulation-exécution-apprentissage » constitue une architecture complémentaire aux approches MARL (présentées supra) en réduisant considérablement le coût et le risque de l'exploration nécessaire à l'apprentissage par renforcement dans des environnements industriels réels.

Mykoniatis et Katsigiannis (2025) démontrent l'intérêt de l'association SMA-DT pour la numérisation de la chaîne d'assemblage automobile. Ainsi, des agents représentant les postes de travail, les robots et les opérateurs humains interagissent avec un jumeau numérique de la chaîne, permettant de simuler et d'optimiser les allocations de tâches en temps réel. Cette architecture hétérogène répond directement aux limitations des systèmes SMA dits « aveugles » qui ne disposaient pas d'une modélisation fidèle de l'état physique du système. Dans le secteur de la grande distribution, la chaîne Dm-drogerie markt a déployé des jumeaux numériques de chacun de ses

¹⁸ Equipement, entrepôt, réseau de distribution

2 000 magasins pour optimiser la gestion des stocks en linéaire, en combinant visibilité en temps réel et les décisions automatiques de réapprovisionnement (DHL, 2024). Selon McKinsey (2024), les entreprises exploitant des jumeaux numériques pour la gestion de leur chaîne logistique bénéficient d'une réduction pouvant atteindre 15% de leurs coûts logistiques et d'une diminution de 20 à 30% de leurs stocks grâce à l'amélioration de la prévision de la demande.

8.2.2 Frontières émergentes : MARL préservant la confidentialité et agents LLM

Deux développements récents méritent une attention particulière pour les perspectives futures des SMA logistiques.

Le premier concerne la confidentialité des données dans les systèmes MARL. En effet, l'une des limites majeures des approches multi-agents d'apprentissage par renforcement réside dans le fait que l'amélioration des performances collective nécessite habituellement un partage d'informations entre acteurs, ce qui soulève des enjeux de confidentialité dans les chaînes logistiques inter-organisationnelles. Zhang et al. (2024) proposent une méthode de MARL préservant la vie privée (Privacy-preserving Multi-Agent Reinforcement Learning, PMaRL) qui permet aux entreprises d'améliorer simultanément la coordination de leurs inventaires et leur performance collective, sans partager d'informations sensibles sur leurs stocks ou leurs politiques d'approvisionnement. Cette architecture exploite les informations de connectivité du réseau logistique comme proxy des informations privées, en accélérant la convergence de l'apprentissage tout en protégeant les données propriétaires. Cette avancée répond directement à l'un des freins métiers les plus fréquemment cités dans la littérature sur l'adoption des SMA inter-organisationnels. Dans le même élan, Hu et al. (2025) proposent l'approche DR-MADRL (Domain Randomization MARL) qui résout un problème majeur du MARL. En effet, les politiques apprises en simulation fonctionnent souvent mal lorsqu'elles sont déployées dans des conditions réelles car l'environnement simulé ne reproduit jamais parfaitement la réalité. Le DR-MADRL contourne la

difficulté en entraînant les agents sur une large variété de scénarios simulés, ce qui rend les politiques obtenues robustes aux imprévus du terrain, et ce, sans nécessiter de réentraînement lors du déploiement.

Le second développement majeur est l'émergence des agents LLM (Large Language Model agents) comme nouvelle génération de SMA logistiques. Ainsi, Jannelli et al. (2025) introduisent des cadres de recherche de consensus spécifiques à la chaîne logistique dans lesquels des agents LLM représentant des entreprises partenaires parviennent à concilier objectifs égoïstes et objectifs systémiques par la conversation. Leurs résultats montrent que ces agents LLM réduisent l'effet de fouet plus efficacement que les politiques de réapprovisionnement classiques et les approches centrées sur la demande. De plus, ils adoptent spontanément des comportements de partage d'informations convergents avec les meilleures pratiques de la littérature sur la chaîne logistique. La flexibilité des LLM (leur capacité à interagir aussi bien avec d'autres agents qu'avec des humains) pourrait lever une barrière historique des SMA traditionnels, à savoir la difficulté d'intégration dans des processus métier où les décisions finales restent entre les mains d'opérateurs humains. Ces développements s'inscrivent dans le contexte plus large du passage vers l'Industrie 5.0, qui réintègre la dimension humaine au centre des systèmes de production et de logistique intelligents, après une décennie d'automatisation centrée sur la performance pure (Industrie 4.0).

En synthèse, la trajectoire des SMA logistiques pour les prochaines années se dessine autour de trois convergences technologiques majeures. Premièrement, l'hybridation SMA-LLM, qui substituera progressivement les agents BDI à architecture rigide par des agents dotés de capacités de raisonnement en langage naturel, réduisant la barrière de conception et d'adoption. Deuxièmement, la boucle SMA-Jumeau Numérique-MARL, qui permettra aux chaînes logistiques d'apprendre en continu dans un environnement simulé fidèle avant de déployer des politiques robustes en conditions réelles, supprimant l'un des freins majeurs au déploiement industriel du MARL.

Troisièmement, les SMA préservant la confidentialité, qui lèveront l'obstacle de la confiance inter-organisationnelle en permettant la coordination et l'apprentissage collectif sans partage de données sensibles. Ces évolutions placent les SMA au cœur de la transformation des chaînes logistiques vers l'Industrie 5.0, où l'intelligence artificielle distribuée et les agents autonomes devront coexister et collaborer harmonieusement avec les acteurs humains dans un cadre de confiance, de durabilité et de responsabilité.

9 REFERENCES

- Algasse, F., Yang, Q., & Au, Y. (2016). Reducing the delivery time in food distribution SMEs using a multi-agent system. In K. Koskinen et al. (Eds.), *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015) (Lecture Notes in Mechanical Engineering)*. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_3
- Ameri, F., McArthur, C. (2013). A multi-agent system for autonomous supply chain configuration. *Int J Adv Manuf Technol* 66, 1097–1112, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4392-9>
- Anane, D., Aknine, S., & Pinson, S. (2009). Coordination d'activités dans les chaînes logistiques : une approche multi-agents par formation de coalitions. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information – Série ISI : Ingénierie des Systèmes d'Information*, 14(2), 113–136, <https://hal.science/hal-01169821>
- Arendt, F., Klein, O., & Barwig, K. (2016). Intelligent control of freight services on the basis of autonomous multi-agent transport coordination (pp. 313–324). Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-319-22288-2_18
- Armstrong, J. (2007). A history of Erlang. *Proceedings of the Third ACM SIGPLAN Conference on History of Programming Languages*, (pp.1–26), <https://doi.org/10.1145/1238844.1238850>
- Baykasoglu, A., & Kaplanoglu, V. (2011). A multi-agent approach to load consolidation in transportation. *Advances in Engineering Software*, 42(7), 477–490, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.03.017>
- Baykasoğlu, A., & Kaplanoğlu, V. (2015). An application oriented multi-agent based approach to dynamic load/truck planning. *Expert Systems with Applications*, 42(15–16), 6008–6025, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.011>
- Bellifemine, F., Caire, G., & Greenwood, D. (2007). *Developing multi-agent systems with JADE*. John Wiley & Sons, <https://doi.org/10.1002/9780470058411>
- Bonabeau, E. (2002). *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(Suppl. 3), 7280–7287, <http://www.jstor.org/stable/3057854>
- Bond, A. H., & Gasser, L. (Eds.). (1988). *Readings in distributed artificial intelligence*. Morgan Kaufmann, <https://doi.org/10.1016/C2013-0-07700-6>
- Busoniu, L., Babuška, R., & De Schutter, B. (2008). A comprehensive survey of multiagent reinforcement learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 38(2), 156–172, <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.913919>
- Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1), 14–23, <https://doi.org/10.1109/JRA.1986.1087032>
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47(1–3), 139–159, [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(91\)90053-M](https://doi.org/10.1016/0004-3702(91)90053-M)
- Calvaresi, D., Dubovitskaya, A., Calbimonte, J. P., Taveter, K., & Schumacher, M. (2018). Multi-Agent Systems and Blockchain: Results from a systematic literature review. In Y. Demazeau, B. An, J. Bajo, & A. Fernández-Caballero (Eds.), *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity: The PAAMS Collection. PAAMS 2018 (Lecture Notes in Computer Science, vol 10978)*. Springer, Cham, 110–126, https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4_9
- Capgemini Research Institute. (2024). *Generative AI in Organizations*, <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2024/05/Final-Web-Version-Report-Gen-AI-in-Organization-Refresh.pdf>
- Cheung, C. F., Wang, W. M., & Kwok, S. K. (2005). Knowledge-based inventory management in production logistics: A multi-agent approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(3), 299–307, <https://doi.org/10.1243/095440505X28990>
- Choi, T.-M., Chiu, C.-H., & Chan, H.-K. (2016). Risk management of logistics systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 90, 1–6, <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2016.03.007>
- Collins, J., Ketter, W., & Gini, M. (2002). A multi-agent negotiation testbed for contracting tasks with temporal and precedence constraints. *International Journal of Electronic Commerce*, 7(1), 35–57, <https://doi.org/10.1080/10864415.2002.11044260>

- Dachry, W., Aghezzaf, B., & Bensassi, B. (2013). Collaborative Information System for Managing the Supply Chain: Architecture Based on a Multi-Agent System. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 2(2), 1-16, https://www.riejournal.com/article_47914.html
- Dahl, O.-J. (2002). The roots of object orientation: the Simula language (pp. 78–90). Springer Berlin Heidelberg. HYPERLINK, https://doi.org/10.1007/978-3-540-39993-3_3
- Dale, J., & Mamdani, E. (2001). Open standards for interoperating agent-based systems. *Software Focus*, 2(1), 1–8, <https://doi.org/10.1002/SWF.18>
- Davidsson, P., Henesey, L., Ramstedt, L., Törnquist, J., & Wernstedt, F. (2005). An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(4), 255–271, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2005.07.002>
- DHL Trend Research. (2024). Digital Twins in Logistics. DHL Customer Solutions & Innovation, <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twin-trend-report.pdf>
- Elock Son, C. & Breka, J.-N. (2023). Digitalisation et industrie 4.0 au sein de la supply chain : contributions et freins. *RFGI* 37(2), 55-70, <https://doi.org/10.53102/2023.37.02.953>.
- Ferber, J., (1995). Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. InterEditions, ISBN 2 7296 0572 X, 1995, 522 p.
- Fikes, R. E., & Nilsson, N. J. (1993). STRIPS, a retrospective. In *Artificial Intelligence in Perspective* (pp. 227–232). MIT Press, <https://doi.org/10.7551/mitpress/1413.003.0035>
- FIPA. (2002). FIPA Agent Communication Language Specifications. Foundation for Intelligent Physical Agents. <http://www.fipa.org/repository/aclspeccs.html>
- Foerster, J., Farquhar, G., Afouras, T., Nardelli, N., & Whiteson, S. (2018). Counterfactual multi-agent policy gradients. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 32(1), 2974–2982, <https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11794>
- Ghadimi, P., Ghassemi Toosi, F., & Heavey, C. (2017). A multi-agent systems approach for sustainable supplier selection and order allocation in a partnership supply chain. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 286–301, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.014>
- Govindan, K., Demartini, M., Formentini, M., Taticchi, P., & Tonelli, F. (2024). Unravelling and mapping the theoretical foundations of sustainable supply chains: A literature review and research agenda. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 189, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103685>
- Hasan, M., & Niyogi, R. (2024). Deep hierarchical reinforcement learning for collaborative object transportation by heterogeneous agents. *Computers & Electrical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.109066>
- Hellingrath, B., & Böhle, C. (2010). Integrierte agentenbasierte Produktions- und Logistikplanung in der Supply Chain. *Künstliche Intelligenz*, 24, 115–122, doi : <https://doi.org/10.1007/s13218-010-0021-7>
- Hewitt, C., Bishop, P., & Steiger, R. (1973). A universal modular ACTOR formalism for artificial intelligence. In *IJCAI '73: Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Artificial Intelligence* (pp. 235–245).
- Hu, J., Xia, L., Huang, T., & Wu, H. (2025). A multi-agent deep reinforcement learning approach for multi-echelon inventory optimization and its application to the beer game. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 203, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104367>
- Huhns, M. N., & Stephens, L. M. (2001). Automating supply chain management. *IEEE Internet Computing*, 5(4), 90–93, <https://doi.org/10.1145/545056.545061>
- Ingalls, D. (2020). The evolution of Smalltalk: from Smalltalk-72 through Squeak. *ACM* 4, 1–101, <https://doi.org/10.1145/3386335>
- Jannelli, V., Schöpf, S., Bickel, M., Netland, T., & Brintrup, A. (2025). Agentic LLMs in the supply chain: towards autonomous multi-agent consensus-seeking. *International Journal of Production Research*, 1–31, <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2604311>
- Kay, A. (1996). The early history of Smalltalk. In *History of Programming Languages Conference* (pp. 511–598), <https://doi.org/10.1145/234286.1057828>
- Khayyat, M., & Awasthi, A. (2016). An intelligent multi-agent based model for collaborative logistics systems. *Transportation Research Procedia*, 12, 325–338, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.069>
- Kindler, E. (2007). Simulation and 40 years of object-oriented programming. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 1(9), 2735–2739, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1329422>
- Lee, J. H., & Kim, C. O. (2007). Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: a review paper. *International Journal of Production Research*, 46(1), 233–265, <https://doi.org/10.1080/00207540701441921>
- Lesueur, M., Bironneau, L., Lux, G. & Morvan, T. (2022). Réflexions sur les usages de la blockchain pour la logistique et le Supply Chain Management : une approche

prospective. RFGI 36(1), 60-82,
<https://doi.org/10.53102/2022.36.01.917>

Lhafiane, F., Elbyed, A., & Bouchoum, M. (2015). Multi-Agent System Architecture Oriented Prometheus Methodology Design for Reverse Logistics. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 9(8), 1914-1920, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1108136>

Li, J., Liu, X., & Montreuil, B. (2023). A multi-agent system for operating hyperconnected freight transportation in the physical Internet. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 7585-7590, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.670>

Liu, X., Hu, M., Peng, C., & Yang, Y. (2024). EXPRESS: Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multi-Echelon Inventory Management. *Production and Operations Management*, <https://doi.org/10.1177/10591478241305863>

Luo, H. (2024). Research on dynamic multi intelligence algorithm and its application in logistics distribution system in post epidemic era (pp. 211-216). Springer Science+Business Media, https://doi.org/10.1007/978-981-99-9538-7_31

McKinsey & Company. (2024). Digital twins: The next frontier in supply chain management. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>

Mezquita, Y., Casado-Vara, R., González Briones, A., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2021). Blockchain-based architecture for the control of logistics activities: pharmaceutical utilities case study. *Logic Journal of the IGPL*, 29(6), 974-985, <https://doi.org/10.1093/jigpal/jzaa039>

Mishra, N., Kumar, V., & Chan, F. T. S. (2011). A multi-agent architecture for reverse logistics in a green supply chain. *International Journal of Production Research*, 50(9), 2396-2406, <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.581003>

Monostori, L., Váncza, J., & Kumara, S. R. T. (2006). Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Annals*, 55(2), 697-720, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.004>

Monostori, L., Váncza, J., & Kumara, S. R. T. (2006). Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Annals*, 55(2), 697-720, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.004>

Moutaoakil, H., & Jamouli, H. (2014). Analyse et modélisation de la chaîne agrumicole marocaine basée sur le système multi-agents et indicateurs de performance. *RFGI* 33(4), 80-99, <https://doi.org/10.53102/2014.33.04.794>

Muravev d., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P., 2021, Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port, *International Journal of Information Management*, Volume 57, 102133, ISSN 0268-4012, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>

Mykoniatis, K., Katsigiannis, M. (2025). Digitalizing the Automotive Assembly Supply Chain Using Multi-Agent-Based Digital Twins. In: Rabadi, G., Soykan, B. (eds) *Optimizing Supply Chains Through Digital Twins*. International Series in Operations Research & Management Science, vol 375. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-032-08147-6_11

Nilsson, N. J. (1984). *Shakey the robot* (Technical Note No. 323). AI Center, SRI International. <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/ADA458918/index.html>

Nitsche, B., Brands, J., Treiblmaier, H., & Gebhardt, J. (2023). The impact of multiagent systems on autonomous production and supply chain networks: use cases, barriers and contributions to logistics network resilience. *Supply Chain Management*, 28(5), 894-908, <https://doi.org/10.1108/SCM-07-2022-0282>

Odell, J., Van Dyke Parunak, H., & Bauer, B. (2000). Extending UML for agents. In G. Wagner, Y. Lesperance, & E. Yu (Eds.), *Proceedings of the Agent-Oriented Information Systems Workshop at the 17th National Conference on Artificial Intelligence* (AAAI 2000), Austin, TX, pp. 3-17. iCue Publishing. <https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/files/54962/54962.pdf>

Orlikowski, W. J. (1992). The duality of technology: rethinking the concept of technology in organizations. *Organization Science*, 3(3), 398-427, <https://doi.org/10.1287/orsc.3.3.398>

Padgham, L., & Winikoff, M. (2002, July). Prometheus: a methodology for developing intelligent agents. In *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Part 1* (pp. 37-38) <https://doi.org/10.1145/544741.544749>

Quan, Y., & Liu, Z. (2024). Invagent: A large language model based multi-agent system for inventory management in supply chains. *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.11384>

Rajan, K., & Saffiotti, A. (2017). Towards a science of integrated AI and robotics. *Artificial Intelligence*, 247,1-9, <https://doi.org/10.1016/j.artint.2017.03.003>

Rao, A. S., & Georgeff, M. P. (1995). BDI agents: From theory to practice. In *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, San Francisco, USA, June 12-14, 1995 (pp. 312-319). AAAI Press. <https://cdn.aaai.org/ICMAS/1995/ICMAS95-042.pdf>

- Rizzati, M., & Landoni, M. (2024). A systematic review of agent-based modelling in the circular economy: Insights towards a general model. *Structural Change and Economic Dynamics*, 69, 617–631, <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.03.013>
- Rosenberg, N. (1982). *Inside the black box: Technology and economics*. Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511611940>
- Rubinstein, A. (1982). Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica*, 50(1), 97–109, <https://doi.org/10.2307/1912531>
- Saberi, S., Shahandeh Nookabadi, A., & Hejazi, S. R. (2012). Applying agent-based system and negotiation mechanism in improvement of inventory management and customer order fulfilment in multi echelon supply chain. *Arab Journal of Science and Engineering*, 37, 851–861, <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0197-2>
- Sakr, A. H., AboElHassan, A., Yacout, S., & Bassetto, S. (2021). Simulation and deep reinforcement learning for adaptive dispatching in semiconductor manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 1–14, <https://doi.org/10.1007/S10845-021-01851-7>
- Sandholm, T. W. (1993). An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations. In *Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-93)* (pp. 256–262). AAAI Press.
- Sandholm, T. W. (1993). An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations. In *Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-93)*, Washington DC, USA (pp. 256–262). AAAI Press. <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/1993/AAAI93-039.pdf>
- Serna-Urán, C. A., Gómez-Marín, C. G., Zapata-Cortes, J. A., & Arango-Serna, M. D. (2021). A multi-agent system for the inventory and routing assignment. In J. L. García Alcaraz, C. Sánchez-Ramírez, & A. J. Gil López (Eds.), *Techniques, Tools and Methodologies Applied to Quality Assurance in Manufacturing* (pp. ...). Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-69314-5_10
- Smith, R. G. (1980). The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, C-29(12), 1104–1113, <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
- Ströbel, M., & Weinhardt, C. (2003). The Montreal Taxonomy for Electronic Negotiations. *Group Decision and Negotiation*, 12(2), 143–164, <https://doi.org/10.1023/A:1023072922126>
- Terrada, L., Khaïli, M. E., & Ouajji, H. (2020). Multi-agents system implementation for supply chain management making-decision. *Procedia Computer Science*, 177, 624–630, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.089>
- Tsai, H.-R., & Chen, T. (2008). Self-adaptive agent-based dynamic scheduling for a semiconductor manufacturing factory (pp. 519–528). Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-540-69134-1_51
- Walmart. (2025). Retail Rewired Report 2025 : Agentic AI at the Heart of Retail Transformation. <https://corporate.walmart.com/content/dam/corporate/documents/newsroom/2025/06/04/walmarts-retail-rewired-report-2025-agentic-ai-at-the-heart-of-retail-transformation/2025-retail-rewired-report.pdf>
- Wang, Y.-L., Ye, S.-W., & Yan, G.-Q. (2010). Multi-agent system developed for the logistics supply chain coordination and risk management. In *International Conference on E-Business and E-Government* (pp. 3243–3246), <https://doi.org/10.1109/ICEE.2010.816>
- Williamson, O. E. (1985). *The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting*. Free Press.
- Wooldridge, M., & Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2), 115–132, <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>
- Wu, J., Ohya, T., & Sekiguchi, T. (2024). Applications of agent-based modeling and simulation in organization management: a quarter-century review through bibliometric mapping (1998–2022). *Computational and Mathematical Organization Theory*, 30, 1–31, <https://doi.org/10.1007/s10588-023-09381-8>
- Xia, J., Li, H., & He, Z. (2023). The effect of blockchain technology on supply chain collaboration: a case study of Lenovo. *Systems*, 11(6), 299, <https://doi.org/10.3390/systems11060299>
- Xu, L., Mak, S., Minaricova, M., & Brintrup, A. (2023a). On implementing autonomous supply chains: a multi-agent system approach. *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arxiv.2310.09435>
- Xu, L., Mak, S., Schoepf, S., Ostroumov, M., & Brintrup, A. (2023b). AgentChat: multi-agent collaborative logistics for carbon reduction. *arXiv*, approx, <https://doi.org/10.48550/arxiv.2309.12781>
- Xue, W., Zhan, S., Chen, N., & Huang, J. (2023). Optimal coordination in logistics warehousing with sensing and communication limits: a distributed differential game approach. *Asian Journal of Control*, 26, 419–435, <https://doi.org/10.1002/asjc.3212>

Zhang, B., Tan, W. J., Cai, W., & Zhang, A. N. (2024). Leveraging multi-agent reinforcement learning for digital transformation in supply chain inventory optimization. *Sustainability*, 16(22), 9996, <https://doi.org/10.3390/su16229996>

Zhang, K., Yang, Z., & Başar, T. (2021). Multi-agent reinforcement learning: a selective overview of theories and algorithms. In K. G. Vamvoudakis, Y. Wan, F. L. Lewis, & D. Cansever (Eds.), *Handbook of Reinforcement Learning and Control* (pp. 321–384). Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-030-60990-0_12



Emmanuel LABARBE est Enseignant à l'université Bordeaux Montaigne. Membre du MICA. Il s'intéresse dans ses recherches au transfert de connaissances intra et inter-entreprises au niveau national

et international.

¹*Emmanuel LABARBE*, MICA, Université Bordeaux Montaigne, France, emmanuel.labarbe@u-bordeaux-montaigne.fr

 : <https://orcid.org/0009-0007-0565-7123>

In Press, Journal Pre-proof*