

# Coordination et Médiation Algorithmiques – Chorégraphie Stigmergie

[André-Guy Bruneau M.Sc. IT](#) – Août 2025

## Abstract

L'avènement des systèmes d'intelligence artificielle (IA) distribués et des systèmes multi-agents (SMA) autonomes marque une transition fondamentale, passant de modèles monolithiques et centralisés à des écosystèmes d'agents intelligents interconnectés. Ces systèmes, capables de résoudre des problèmes d'une complexité inaccessible à une entité unique, promettent de révolutionner des domaines allant de la logistique à la finance. Cependant, leur potentiel est intrinsèquement lié à un défi majeur : la coordination décentralisée. Comment assurer un comportement collectif cohérent, robuste et aligné parmi des agents autonomes qui ne disposent que de vues locales de l'environnement et opèrent sans contrôle centralisé? Les approches traditionnelles, souvent basées sur des hypothèses de rationalité parfaite et de communication synchrone, se révèlent inadaptées face à la nature non déterministe, au comportement émergent et à la complexité systémique de ces nouveaux paradigmes.

Cet essai avance une thèse centrale : la conception de SMA autonomes robustes, évolutifs et fiables ne peut être réalisée qu'à travers une synergie indissociable et une co-conception holistique de trois piliers fondamentaux. Le premier est l'**Architecture**, incarnée par l'Architecture Pilotée par Événements (EDA), qui fournit le substrat de communication asynchrone indispensable à l'autonomie des agents, tout en introduisant des défis inhérents de latence, d'ordre partiel et d'observabilité. Le deuxième pilier est la **Logique**, matérialisée par des algorithmes de médiation et de coordination. S'appuyant sur les fondements de la théorie des jeux et de la conception de mécanismes, ces algorithmes (enchères, négociation, consensus) fournissent les protocoles par lesquels les agents allouent les ressources, délèguent les tâches et parviennent à une cohérence collective, même face à une rationalité limitée et une information imparfaite. Le troisième et dernier pilier est la **Gouvernance**, une discipline émergente baptisée **AgentOps**. Celle-ci constitue le cadre opérationnel indispensable pour gérer le cycle de vie, surveiller le comportement et garantir la fiabilité de systèmes intrinsèquement non déterministes. L'AgentOps répond directement aux défis posés par l'architecture EDA en fournissant les outils d'observabilité, de détection d'anomalies et de gestion des modes de défaillance comportementaux qui échappent aux paradigmes MLOps traditionnels.

En analysant le maillage agentique (*Agentic Mesh*) comme un système complexe adaptatif, ce travail explore en profondeur l'interaction entre ces trois dimensions. Il démontre que la topologie organisationnelle influence directement l'efficacité des protocoles de négociation, que le choix d'une architecture asynchrone conditionne la nature des algorithmes de consensus requis, et que la présence d'un comportement émergent impose un cadre de gouvernance comportementale. La conclusion de cette analyse est sans équivoque : ignorer l'une de ces dimensions au profit des autres conduit inévitablement à des systèmes fragiles, imprévisibles et non fiables. Seule une approche de co-design, qui reconnaît et exploite les dépendances critiques entre l'infrastructure de communication, la logique de décision et le contrôle opérationnel, permettra de réaliser la promesse des systèmes d'IA distribués à grande échelle.

## Glossaire des termes clés et acronymes

- **A2A (Agent-to-Agent)** : Protocoles standardisés permettant la communication et l'interopérabilité entre agents hétérogènes.<sup>1</sup>
- **ABN (Argumentation-Based Negotiation)** : Négociation basée sur l'argumentation. Un paradigme de négociation où les agents échangent non seulement des offres, mais aussi des arguments (justifications, critiques) pour influencer les croyances et préférences des autres.<sup>3</sup>
- **AgentOps** : Discipline émergente axée sur l'opérationnalisation, la surveillance, le débogage et la gouvernance des systèmes d'IA agentiques, en particulier ceux qui sont non déterministes et présentent un comportement émergent.<sup>5</sup>
- **CAS (Complex Adaptive System)** : Système complexe adaptatif. Un système composé de multiples agents interagissant de manière non linéaire, capable de s'auto-organiser et de s'adapter à son environnement, donnant lieu à des comportements émergents.<sup>7</sup>
- **CNP (Contract Net Protocol)** : Protocole du réseau contractuel. Un protocole de négociation de haut niveau pour la délégation de tâches distribuées, basé sur une métaphore de marché avec des annonces de tâches, des offres et des attributions de contrats.<sup>9</sup>
- **Cohérence Éventuelle (Eventual Consistency)** : Un modèle de cohérence dans les systèmes distribués qui garantit que, en l'absence de nouvelles mises à jour, toutes les répliques d'une donnée finiront par converger vers la même valeur.<sup>11</sup>
- **EDA (Event-Driven Architecture)** : Architecture pilotée par les événements. Un paradigme architectural qui promeut la production, la détection, la consommation et la réaction à des événements, permettant un couplage lâche entre les composants logiciels.<sup>13</sup>
- **Équilibre de Stackelberg (Stackelberg Equilibrium)** : Un concept de solution en théorie des jeux pour les jeux séquentiels hiérarchiques, où un "leader" agit en premier et un "suiveur" réagit de manière optimale à l'action du leader.<sup>14</sup>
- **Maillage Agentique (Agentic Mesh)** : Un paradigme architectural et une couche de gouvernance conçus pour orchestrer, sécuriser et observer des écosystèmes d'agents d'IA autonomes et distribués, en externalisant les fonctions de gestion pour éviter le chaos opérationnel.<sup>1</sup>
- **MARL (Multi-Agent Reinforcement Learning)** : Apprentissage par renforcement multi-agents. Un sous-domaine de l'apprentissage automatique où plusieurs agents apprennent simultanément en interagissant avec un environnement commun.<sup>16</sup>
- **MCP (Model Context Protocol)** : Protocole de contexte de modèle. Un standard ouvert visant à normaliser le partage de contexte entre les agents et les outils, favorisant l'interopérabilité.<sup>2</sup>
- **Rationalité Limitée (Bounded Rationality)** : L'idée que la rationalité des individus est limitée par l'information dont ils disposent, leurs limitations cognitives et le temps limité pour prendre une décision. Les agents "satisfont" (cherchent une solution satisfaisante) plutôt qu'ils n'optimisent.<sup>17</sup>
- **SCA (Système Complexe Adaptatif)** : Voir CAS.
- **SMA (Système Multi-Agents)** : Un système informatisé composé de multiples agents intelligents en interaction qui collaborent ou rivalisent pour atteindre des objectifs.<sup>19</sup>
- **Stigmergie Numérique (Digital Stigmergy)** : Un mécanisme de coordination indirecte où les agents communiquent en laissant des traces ou des marqueurs dans un environnement numérique partagé,<sup>20</sup>

# Introduction Générale

## 1. Contexte : L'Avènement des Systèmes Multi-Agents (SMA) Autonomes et l'IA Distribuée

Le paysage de l'intelligence artificielle connaît une transformation profonde, s'éloignant des systèmes monolithiques centralisés pour adopter des architectures distribuées composées d'agents multiples et autonomes.<sup>22</sup> Cette évolution est catalysée par les avancées spectaculaires des grands modèles de langage (LLM), qui dotent les agents logiciels de capacités de raisonnement, de planification et de compréhension contextuelle sophistiquées, se rapprochant de l'intelligence humaine.<sup>24</sup> Un système multi-agents (SMA) est défini comme un système informatisé composé de multiples agents intelligents en interaction, capables de résoudre des problèmes qui sont difficiles, voire impossibles, à traiter pour un agent individuel ou un système monolithique.<sup>19</sup> En distribuant l'intelligence et la prise de décision, les SMA permettent de diviser le travail, de répondre à des signaux locaux et de résoudre collaborativement des problèmes complexes.<sup>26</sup> Cette approche est particulièrement adaptée aux domaines où les données, le contrôle ou l'expertise sont intrinsèquement décentralisés, comme dans la logistique, la robotique collective, l'automatisation d'entrepôts ou les systèmes de transport intelligents.<sup>23</sup> L'attrait des SMA réside dans leurs propriétés fondamentales : l'extensibilité, la robustesse grâce à la redondance, et la spécialisation des agents, où chaque entité peut posséder des compétences et des objectifs distincts.<sup>22</sup>

## 2. Problématique : Le Défi de la Coordination Décentralisée et les Limites des Approches Traditionnelles

Malgré leur potentiel immense, la réalisation de SMA efficaces se heurte à un obstacle fondamental : le défi de la coordination décentralisée. La coordination est le processus par lequel plusieurs agents gèrent les dépendances entre leurs activités pour améliorer la performance globale du système.<sup>28</sup> Elle a été décrite comme le "problème déterminant" du travail collaboratif dans les SMA.<sup>24</sup> Le défi découle directement des caractéristiques essentielles de ces systèmes : chaque agent est autonome, ne possède qu'une vue locale et partielle de l'environnement, et il n'existe pas de contrôleur global désigné.<sup>19</sup> Dans un tel contexte, comment les agents peuvent-ils parvenir à un comportement collectif cohérent? Comment allouent-ils les tâches, partagent-ils les ressources et résolvent-ils les conflits pour atteindre un objectif commun?

Les approches traditionnelles de la coordination, souvent centralisées, se révèlent inadéquates. Un contrôleur central, bien qu'il puisse simplifier la prise de décision, devient rapidement un goulot d'étranglement computationnel, un point unique de défaillance, et est souvent infaisable dans des environnements dynamiques et à grande échelle où la centralisation de toute l'information est impossible ou trop coûteuse.<sup>29</sup> D'un autre côté, laisser les agents agir de manière purement décentralisée sans mécanismes de coordination robustes peut conduire au chaos, à des actions redondantes ou contradictoires, et à l'incapacité d'atteindre des objectifs globaux. La question centrale est donc de trouver le juste équilibre, en concevant des mécanismes qui permettent l'émergence d'un ordre global à partir d'interactions locales.

## 3. Thèse Centrale : La Synergie Indispensable entre Architecture (EDA), Logique (Algorithmes de Médiation) et Gouvernance (AgentOps)

Face à ce défi, cet essai défend la thèse selon laquelle la conception de SMA autonomes, robustes et fiables repose sur la synergie indispensable et la co-conception de trois piliers interdépendants.

1. **L'Architecture** : Le fondement de tout SMA autonome est une architecture qui permet le découplage et la communication asynchrone. L'Architecture Pilotée par Événements (EDA) est le paradigme de choix, car elle libère les agents des contraintes de la communication synchrone, leur permettant d'agir et de réagir de manière indépendante. Cependant, cette liberté architecturale a un coût : elle introduit des défis fondamentaux de coordination, tels que la latence, l'ordre partiel des événements et une observabilité globale limitée.
2. **La Logique** : Pour surmonter les défis posés par l'architecture, une logique de coordination algorithmique est nécessaire. Des algorithmes de médiation, inspirés de la théorie des jeux et de la conception de mécanismes, fournissent les protocoles par lesquels les agents peuvent négocier, former des consensus, allouer des ressources et déléguer des tâches. Ces mécanismes doivent être suffisamment robustes pour fonctionner dans des conditions d'information imparfaite et de rationalité limitée.
3. **La Gouvernance** : L'interaction d'agents autonomes au sein d'une architecture asynchrone donne naissance à un comportement émergent et non déterministe. Gérer ce comportement en production est au-delà des capacités des cadres opérationnels traditionnels comme DevOps ou MLOps. Une nouvelle discipline, l'**AgentOps**, est impérative. Elle fournit le cadre de gouvernance pour le cycle de vie des agents, la surveillance comportementale, la détection d'anomalies et la gestion des modes de défaillance systémiques, garantissant que le système reste fiable, sécurisé et aligné sur ses objectifs.

La thèse centrale est donc que ces trois piliers ne sont pas des choix de conception indépendants, mais des composants d'un système intégré qui doivent être co-conçus.<sup>31</sup> L'architecture EDA crée le besoin d'algorithmes de consensus tolérants à l'ordre partiel et impose la nécessité d'une gouvernance AgentOps pour gérer l'imprévisibilité qu'elle engendre.

#### 4. Fondements Théoriques : Théorie des Jeux, Théorie de la Complexité et Cybernétique

Pour étayer cette thèse, cet essai s'appuie sur trois piliers théoriques fondamentaux qui fournissent les langages et les cadres conceptuels nécessaires à l'analyse des SMA.

- **Théorie des Jeux** : Elle offre l'appareil mathématique pour modéliser et analyser les interactions stratégiques entre des agents rationnels (ou à rationalité limitée). Elle permet de formaliser les situations de coopération, de compétition et de négociation, et de définir des concepts de solution stables comme l'équilibre de Nash, qui sont essentiels pour la conception de protocoles de coordination.<sup>26</sup>
- **Théorie de la Complexité** : Elle fournit le cadre pour comprendre les SMA non pas comme des systèmes compliqués, mais comme des Systèmes Complexes Adaptatifs (SCA). Cette perspective met l'accent sur des phénomènes tels que l'émergence, l'auto-organisation et la non-linéarité, où des comportements globaux sophistiqués naissent de règles locales simples suivies par les agents. Elle nous enseigne que le comportement du maillage agentique ne peut être prédit en analysant ses composants isolés.<sup>7</sup>
- **Cybernétique** : La science du contrôle et de la communication dans les systèmes vivants et artificiels offre une perspective de haut niveau sur la régulation, la rétroaction et la gouvernance. Elle nous guide vers une vision future des SMA en tant que systèmes d'une "cybernétique organisationnelle", où la conception se concentre sur la création d'environnements et de règles qui permettent au système de s'auto-réguler et d'évoluer de manière résiliente.<sup>35</sup>

## 5. Structure

Cet essai est structuré en quatre parties principales pour développer méthodiquement la thèse centrale.

- **Partie I : Fondements Architecturaux du Maillage Agentique** établit les bases architecturales. Elle définit le paradigme du maillage agentique, analyse les topologies organisationnelles et leurs dynamiques, et positionne l'architecture pilotée par événements comme le substrat de communication essentiel, tout en soulignant ses défis inhérents.
- **Partie II : Mécanismes de Coordination et de Médiation Algorithmique** se concentre sur la logique de coordination. Elle explore les fondements théoriques de la théorie des jeux et de la conception de mécanismes, puis examine en détail des protocoles spécifiques pour la négociation, l'allocation de ressources, le consensus et l'apprentissage adaptatif.
- **Partie III : AgentOps : Gouvernance Opérationnelle des Systèmes Non Déterministes** aborde le pilier de la gouvernance. Elle définit l'AgentOps comme une nécessité face aux limites de DevOps/MLOps, et détaille ses composantes clés : l'observabilité comportementale, la surveillance, et une taxonomie des modes de défaillance pour assurer la robustesse du maillage.
- **Partie IV : Synthèse et Perspectives** conclut l'essai en synthétisant les arguments pour une conception holistique et un co-design des trois piliers. Elle explore les concepts avancés de résilience et d'anti-fragilité et propose une vision de l'avenir de la coordination agentique en tant que forme de cybernétique organisationnelle.

## PARTIE I : FONDEMENTS ARCHITECTURAUX DU MAILLAGE AGENTIQUE

### Chapitre 1 : Le Paradigme du Maillage Agentique (*Agentic Mesh*)

La prolifération d'agents d'IA autonomes au sein des organisations, bien que prometteuse, introduit une nouvelle classe de risques systémiques. Sans un cadre de gouvernance et une architecture appropriée, ce qui commence comme une automatisation intelligente peut rapidement dégénérer en un "chaos agentique".<sup>2</sup> Le maillage agentique (*Agentic Mesh*) émerge comme le paradigme architectural et de gouvernance conçu pour imposer de l'ordre à cet écosystème, en équilibrant l'autonomie des agents avec un contrôle centralisé et une surveillance universelle.

#### 1.1. Définition et Principes Fondamentaux : Autonomie, Vues Locales, Décentralisation

Le maillage agentique est défini comme un paradigme architectural composable, distribué et agnostique vis-à-vis des fournisseurs, qui permet à de multiples agents de raisonner, collaborer et agir de manière autonome à travers un large éventail de systèmes, d'outils et de modèles de langage, le tout de manière sécurisée, à l'échelle et conçue pour évoluer avec la technologie.<sup>2</sup> Il agit comme une couche de connectivité et d'orchestration qui externalise les aspects de gestion tels que la sécurité, la gouvernance et l'observabilité, à l'instar d'un *service mesh* pour les microservices.<sup>1</sup> En centralisant la gestion tout en permettant une exécution décentralisée, le maillage soulage les agents individuels de la charge de la sécurité et de la surveillance, leur permettant de se concentrer sur leurs fonctionnalités principales.<sup>1</sup>

Ce paradigme repose sur un ensemble de principes de conception fondamentaux qui répondent directement aux caractéristiques inhérentes des SMA : l'autonomie, les vues locales et la décentralisation.<sup>19</sup>

Les principes clés incluent :

- **Gouvernance de l'Autonomie (Governed Autonomy)** : Le comportement des agents est contrôlé de manière proactive par des politiques, des permissions et des mécanismes d'escalade intégrés qui garantissent un fonctionnement sûr et transparent. Ce principe clé établit un équilibre entre l'exécution décentralisée des tâches par les agents et un contrôle stratégique centralisé.<sup>1</sup>
- **Composabilité** : Tout agent, outil ou LLM peut être intégré dans le maillage sans nécessiter une refonte du système. Cette modularité maximise la flexibilité et la réutilisation des composants.<sup>2</sup>
- **Intelligence Distribuée** : Les tâches complexes peuvent être décomposées et résolues par des réseaux d'agents coopérants, chacun apportant sa spécialisation.<sup>2</sup>
- **Découplage en Couches** : Les fonctions de logique, de mémoire, d'orchestration et d'interface sont découplées pour maximiser la modularité et la maintenabilité du système.<sup>2</sup>
- **Observabilité Universelle** : Le maillage fournit une visibilité détaillée sur les comportements, les interactions et les métriques de performance des agents, transformant ce qui pourrait être une "boîte noire" en un système transparent et responsable.<sup>1</sup>
- **Sécurité "Zéro Confiance" (Zero-Trust Security)** : Aucune entité au sein du maillage n'est implicitement fiable. Chaque interaction doit être vérifiée en continu, avec des mesures de sécurité intégrées dans le cycle de vie de chaque agent pour sécuriser l'écosystème contre les angles morts potentiels.<sup>1</sup>
- **Neutralité des Fournisseurs et Interopérabilité** : Les composants peuvent être mis à jour ou remplacés indépendamment, évitant le verrouillage par un fournisseur. Cela favorise l'utilisation de protocoles standardisés comme A2A (Agent-to-Agent) et MCP (Model Context Protocol) pour assurer une interopérabilité transparente.<sup>1</sup>

## 1.2. Évolution Conceptuelle : Du *Service Mesh* et *Data Mesh* au Maillage Agentique

Le concept de maillage agentique n'est pas né dans le vide ; il représente l'évolution logique de paradigmes architecturaux antérieurs conçus pour gérer la complexité des systèmes distribués.

- Le **Service Mesh** est apparu pour gérer la complexité des communications réseau entre les microservices. Il fournit une couche d'infrastructure dédiée pour rendre les interactions entre services fiables, sécurisées et observables, en externalisant des fonctionnalités comme la découverte de services, l'équilibrage de charge et le cryptage.
- Le **Data Mesh** a ensuite appliqué des principes similaires à la gestion des données analytiques à l'échelle de l'entreprise. Il s'oppose aux lacs de données monolithiques en prônant une architecture décentralisée où les données sont traitées comme un "produit", détenu et géré par des équipes de domaine spécifiques. Il met l'accent sur la propriété décentralisée, une plateforme de données en libre-service et une gouvernance fédérée.<sup>37</sup>

Le **Maillage Agentique** étend cette philosophie à un niveau d'abstraction supérieur. Alors que le Service Mesh gère la communication de *services* (données transactionnelles) et que le Data Mesh gouverne les *produits de données* (données analytiques), le Maillage Agentique est conçu pour gouverner les *comportements* et les *décisions* autonomes.<sup>1</sup> Il ne se contente pas de gérer des flux de données ou des appels d'API, mais orchestre des écosystèmes d'agents qui raisonnent, planifient et agissent, souvent de manière non déterministe. Il s'agit donc d'une évolution naturelle, passant à la gouvernance de l'intelligence distribuée.



### 1.3. Le Maillage comme Système Complexe Adaptatif (SCA)

Il est fondamental de comprendre que le maillage agentique n'est pas simplement une architecture technique, mais la manifestation d'un Système Complexe Adaptatif (SCA), également connu sous le nom de Complex Adaptive System (CAS).<sup>7</sup> Un SCA est un système composé de multiples agents qui interagissent de manière non linéaire, capables de s'adapter et de s'auto-organiser pour mieux s'adapter à leur environnement.<sup>7</sup> Les SMA sont une forme de modélisation de SCA.<sup>39</sup>

Les propriétés clés d'un SCA, qui sont directement applicables au maillage agentique, sont :

- **Émergence** : Le comportement global du maillage est supérieur à la somme de ses parties. Des propriétés de haut niveau, comme une stratégie de marché coordonnée ou une chaîne logistique optimisée, "émergent" des interactions locales entre les agents, sans avoir été explicitement programmées dans un contrôleur central. L'intelligence du système réside dans les interactions, pas seulement dans les agents individuels.<sup>8</sup>
- **Auto-organisation** : L'ordre et la structure au sein du maillage peuvent se former spontanément, sans contrôle externe. Les agents s'organisent continuellement en réponse aux signaux de leur environnement et aux actions des autres agents. Des hiérarchies, des coalitions ou des modèles de coopération peuvent se former et se dissoudre dynamiquement.<sup>7</sup>
- **Adaptation** : Le système est résilient face aux perturbations. Les agents individuels peuvent apprendre et modifier leurs stratégies, et le système dans son ensemble peut évoluer en réponse aux changements de l'environnement ou aux défaillances de certains de ses composants.<sup>8</sup>
- **Non-linéarité** : La relation de cause à effet n'est pas directe. De petits changements dans les règles d'un agent ou dans l'environnement peuvent se propager à travers le système et entraîner des effets disproportionnés et souvent imprévisibles sur le comportement global.<sup>7</sup>

Cette perspective a une implication profonde pour la conception et la gouvernance. Elle signifie que l'on ne peut pas "programmer" directement le comportement souhaité du maillage. Au lieu de cela, la tâche de l'ingénieur est de concevoir les agents, leurs règles d'interaction et l'environnement de manière que le comportement global souhaité *émerge*. C'est précisément ici que le rôle du maillage agentique en tant que cadre de gouvernance devient crucial. Ses principes, tels que la "gouvernance de l'autonomie" et l'"observabilité universelle", ne sont pas de simples bonnes pratiques, mais des mécanismes de contrôle essentiels pour guider et contraindre le comportement émergent potentiellement chaotique du SCA sous-jacent, le rendant ainsi apte à être utilisé de manière fiable dans des applications d'entreprise.

## Chapitre 2 : Topologies Organisationnelles et Dynamiques d'Interaction

La manière dont les agents sont structurés et interconnectés — leur topologie organisationnelle — est un facteur déterminant pour la performance, la robustesse et l'efficacité d'un système multi-agents. La topologie définit les canaux de communication, les relations d'autorité et les flux de connaissances, influençant ainsi directement la capacité du système à coordonner ses actions, à négocier des accords et à parvenir à un consensus.<sup>29</sup> Ce chapitre analyse différentes structures organisationnelles, des plus simples aux plus complexes, et modélise leurs dynamiques d'interaction.

## 2.1. Analyse Comparative des Structures : Niveau Égal (*Equi-Level*), Hiérarchique (*Master-Subordinate*), Hybride

Les topologies de SMA peuvent être classées en plusieurs catégories principales, chacune présentant un compromis distinct entre l'autonomie des agents et l'efficacité de la coordination.<sup>29</sup>

- **Structure de Niveau Égal (*Equi-Level / Web-like*)** : Dans cette topologie, tous les agents sont des pairs et peuvent potentiellement interagir directement les uns avec les autres, formant un graphe complet. Il n'y a pas d'autorité centrale.
  - *Avantages* : Cette structure offre une autonomie maximale aux agents et une grande tolérance aux pannes, car la défaillance d'un agent n'entraîne pas celle du système. Elle favorise le parallélisme et la redondance.<sup>29</sup>
  - *Inconvénients* : La coordination peut être complexe et coûteuse en communication, car chaque agent doit potentiellement gérer des interactions avec tous les autres. La résolution des incohérences de données et l'adaptation à des objectifs changeants sont difficiles sans un point de contrôle central.<sup>29</sup>
- **Structure Hiérarchique (*Master-Subordinate / Star-like*)** : Cette topologie introduit une relation d'autorité où un ou plusieurs agents "maîtres" (ou facilitateurs, médiateurs) coordonnent les activités d'agents "subordonnés". La communication entre les subordonnés passe souvent par le maître.
  - *Avantages* : Elle améliore l'efficacité opérationnelle et la flexibilité de la configuration. La coordination est simplifiée, les conflits sont plus faciles à résoudre, et la conception des agents subordonnés est moins complexe car ils n'interagissent qu'avec leur superviseur. Cette structure est bien adaptée à l'automatisation des processus et à la résolution de problèmes distribués où une planification centrale est bénéfique.<sup>27</sup>
  - *Inconvénients* : Le maître peut devenir un goulot d'étranglement pour la communication et un point unique de défaillance. L'autonomie des agents est réduite.<sup>29</sup>
- **Structures Hybrides (*Grid-like, HCAN*)** : Ces topologies cherchent à combiner les avantages des deux modèles précédents.
  - ***Grid-like*** : Les agents interagissent principalement avec leurs voisins immédiats au sein d'un "quartier" ou d'une agence, qui peut être supervisée par un facilitateur local. Les interactions à plus grande distance sont médiatisées par ces facilitateurs. Cela réduit la charge de communication tout en maintenant un certain degré de contrôle local.<sup>29</sup>
  - ***Hierarchical Collective Agent Network (HCAN)*** : Cette structure organise les agents en couches hiérarchiques. Les agents d'une même couche ne sont pas connectés, mais les agents de couches adjacentes le sont pleinement. Le contrôle est exercé de manière descendante. Ce modèle offre un bon équilibre entre le calcul distribué au sein des couches et le contrôle centralisé entre les couches, ce qui simplifie la coordination et améliore la sécurité.<sup>29</sup>



Tableau, adapté de l'analyse de Zhu <sup>29</sup>, résume les caractéristiques et les évaluations de ces topologies.

Caractéristique	Web (Niveau Égal)	Star (Hiérarchique)	Grid (Hybride)	HCAN (Hybride)
<b>Contrôleur central / médiateur?</b>	Non	Oui	Partiellement	Partiellement
<b>Agents au même niveau?</b>	Oui	Non	Non	Non
<b>Interaction un-vers-tous?</b>	Oui	Non	Non	Non
<b>Lien de communication complet?</b>	Oui	Non	Partiellement	Partiellement
<b>Distinction local/global?</b>	Non	Non	Oui	Oui
<b>Réponse de service automatique?</b>	Oui	Non	Partiellement	Partiellement
<b>Évaluation (1-5)</b>				
<i>Autonomie</i>	5	1	3	4
<i>Coopération</i>	2	5	3	4
<i>Confiance</i>	1	5	5	5
<i>Flexibilité</i>	5	5	5	4
<i>Adaptabilité</i>	2	5	5	5
<i>Interactivité</i>	3	1	3	5
<i>Réactivité</i>	2	5	3	5

## 2.2. Modélisation des Interactions Hiérarchiques (Jeux de Stackelberg)

Les structures hiérarchiques, omniprésentes dans les SMA, peuvent être à l'aide de la théorie des jeux, et plus spécifiquement par les jeux de Stackelberg,<sup>14</sup> qui est un modèle de décision stratégique qui capture une

interaction séquentielle et hiérarchique entre deux types de joueurs : un **leader** et un **follower** (suiveur).<sup>15</sup>

Le déroulement du jeu est le suivant :

1. Le **leader** agit en premier. Il choisit sa stratégie en anticipant la manière dont le follower réagira. Le leader résout un problème d'optimisation à deux niveaux : il cherche à minimiser sa propre fonction de coût, sous la contrainte que le follower choisira toujours la meilleure réponse à la stratégie du leader.<sup>41</sup>
2. Le **follower** observe l'action du leader et choisit ensuite sa propre stratégie pour optimiser son propre objectif, en prenant la décision du leader comme une donnée fixe.<sup>14</sup>

L'issue de ce jeu est un **équilibre de Stackelberg**. Il s'agit d'un profil de stratégies conjointes  $(x_1^*, x_2^*)$  où  $x_1^*$  est la stratégie optimale du leader, en supposant que le follower jouera sa meilleure réponse  $x_2^* = \operatorname{argmin}_y f_2(x_1^*, y)$ , où  $f_1$  et  $f_2$  sont les fonctions de coût respectives du leader et du follower.<sup>42</sup>

Ce modèle est particulièrement pertinent pour les SMA hiérarchiques. Un agent orchestrateur qui décompose une tâche et l'assigne à des agents travailleurs agit comme un leader. Il doit choisir la meilleure décomposition en anticipant comment les travailleurs (followers) exécuteront leurs sous-tâches. De même, dans les scénarios de coopération guidée, un agent plus expérimenté ou doté de plus de ressources (le leader) peut fournir des orientations stratégiques à un agent moins expérimenté (le follower) pour atteindre un objectif commun de manière plus efficace.<sup>43</sup> La modélisation de Stackelberg permet de concevoir des stratégies de contrôle optimales pour de telles interactions asymétriques.

### 2.3. Influence de la Topologie du Réseau sur le Consensus et la Négociation

La topologie du réseau d'interaction n'est pas un simple détail d'implémentation ; elle est une contrainte fondamentale qui façonne la dynamique de la coordination.<sup>29</sup> Son influence est particulièrement visible dans deux processus clés : la négociation et la recherche de consensus.

- **Négociation** : La structure du réseau influence la manière dont les agents choisissent leurs partenaires de négociation et adaptent leurs stratégies. Des études montrent que les caractéristiques topologiques, telles que la centralité d'un nœud ou la force des liens entre agents, peuvent être utilisées pour prédire l'issue d'une négociation.<sup>44</sup> Un agent peut adopter une stratégie plus conciliante lorsqu'il négocie avec un agent "bien connecté" ou influent au sein du réseau, car le maintien d'une bonne relation peut avoir des avantages à long terme. La topologie peut ainsi créer des dynamiques de pouvoir implicites qui affectent les résultats de la négociation, même entre des agents supposément égaux.<sup>44</sup>
- **Consensus** : L'atteinte d'un consensus, où tous les agents s'accordent sur une valeur commune, dépend de manière critique des propriétés de connectivité du graphe d'interaction. Pour que l'information puisse se propager à l'ensemble du système et permettre la convergence, le graphe doit être "enraciné" (c'est-à-dire qu'il doit exister un chemin depuis au moins un agent, la "racine", vers tous les autres agents).<sup>46</sup> Des outils issus de la théorie des graphes, comme la matrice Laplacienne, sont essentiels pour analyser la vitesse et la stabilité de la convergence des algorithmes de consensus. La connectivité algébrique du graphe (la deuxième plus petite valeur propre de la matrice Laplacienne) est par exemple directement liée à la vitesse de convergence.<sup>46</sup> Ainsi, la conception de la topologie est une étape cruciale dans la conception de systèmes capables de parvenir à une cohérence collective.

## 2.4. Structures Organisationnelles Dynamiques et Adaptatives

Dans des environnements complexes, ouverts et hétérogènes, une structure organisationnelle statique est rarement optimale. Les SMA doivent être capables de s'adapter aux changements imprévisibles, ce qui nécessite des structures organisationnelles dynamiques.<sup>36</sup> Cette réorganisation peut se produire à deux niveaux :

1. **Niveau micro (individuel)** : Un agent peut modifier ses propres comportements et ses interactions avec ses voisins pour s'adapter à son environnement local. Il peut changer de rôle, apprendre de nouvelles stratégies ou modifier ses liens de communication.<sup>36</sup>
2. **Niveau macro (organisationnel)** : Le système dans son ensemble peut modifier sa structure. Cela peut impliquer l'ajout ou le retrait d'agents, la restructuration des hiérarchies, ou la formation et la dissolution de coalitions ou d'équipes temporaires pour répondre à des besoins spécifiques.<sup>36</sup>

La capacité à former dynamiquement des coalitions est un exemple puissant d'adaptation organisationnelle. Les agents peuvent s'allier temporairement pour combiner leurs ressources et leurs compétences afin de s'attaquer à une tâche qu'ils ne pourraient pas accomplir seuls.<sup>27</sup> Ces structures émergentes et adaptatives sont une caractéristique des systèmes résilients et sont essentielles pour maintenir l'efficacité dans des environnements qui évoluent constamment.

## Chapitre 3 : L'Architecture Pilotée par Événements (EDA) comme Substrat de Communication

Pour qu'un système multi-agents puisse fonctionner efficacement, son architecture de communication doit soutenir la caractéristique la plus fondamentale de ses composants : l'autonomie. Une communication synchrone et étroitement couplée entrave cette autonomie, créant des dépendances rigides et des goulots d'étranglement. L'Architecture Pilotée par Événements (EDA) émerge comme le paradigme architectural de choix, car elle est conçue pour permettre un couplage lâche et une interaction asynchrone, qui sont les prérequis essentiels à une véritable autonomie agentique.

### 3.1. L'Impératif du Découplage Temporel, Logique et Spatial

L'EDA est un modèle architectural dans lequel les composants du système communiquent par la production et la consommation d'événements.<sup>13</sup> Un événement est une notification d'un changement d'état significatif. Plutôt que d'invoquer directement un autre service (comme dans un modèle requête-réponse), un composant (un agent "émetteur") publie un événement sur un canal de communication (souvent un "bus d'événements" ou un "broker"). D'autres composants (les agents "consommateurs") s'abonnent à ces événements et réagissent lorsqu'ils se produisent.

Ce modèle instaure un découplage puissant à plusieurs niveaux :

- **Découplage Temporel** : L'émetteur et le consommateur n'ont pas besoin d'être actifs en même temps. L'émetteur publie l'événement et peut continuer son travail. Le consommateur traitera l'événement lorsqu'il sera disponible.
- **Découplage Spatial** : Les composants n'ont pas besoin de se connaître directement. L'émetteur ne sait pas qui consommera son événement, et le consommateur ne sait pas qui l'a produit. Ils ne connaissent que le canal d'événements.

- **Découplage Logique** : La logique métier de l'émetteur est indépendant de celle du consommateur. Un même événement peut déclencher des actions très différentes dans plusieurs consommateurs, sans que l'émetteur n'ait à en connaître les détails.

Ce découplage est impératif pour les SMA, car il permet d'ajouter, de retirer ou de modifier des agents sans perturber le reste du système, offrant ainsi une extensibilité et une résilience accrues.<sup>49</sup>

### 3.2. L'Asynchronicité comme Prérequis à l'Autonomie Agentique

L'autonomie d'un agent est sa capacité à opérer indépendamment, sans contrôle direct et continu.<sup>19</sup> Dans un modèle de communication synchrone (requête-réponse), l'appelant est bloqué en attendant la réponse de l'appelé. Cette dépendance temporelle est l'antithèse de l'autonomie. Si l'agent appelé est lent ou indisponible, l'agent appelant est paralysé. Ce modèle crée des chaînes de dépendances rigides qui sont fragiles et difficiles à faire évoluer.<sup>49</sup>

L'asynchronicité, fournie nativement par l'EDA, brise ces chaînes. Un agent peut émettre un événement et passer immédiatement à sa tâche suivante. Les autres agents réagiront à cet événement selon leur propre rythme et leur propre logique. Cette approche permet une véritable exécution parallèle des tâches, améliore la réactivité globale du système et le rend beaucoup plus résilient aux défaillances partielles.<sup>11</sup> Un agent peut tomber en panne et redémarrer pour traiter les événements qui se sont accumulés dans sa file d'attente, sans que sa défaillance temporaire n'ait bloqué les autres agents du système. L'asynchronicité n'est donc pas une simple optimisation de performance ; c'est une condition architecturale nécessaire à l'émergence d'un comportement agentique autonome et robuste.

### 3.3. La Stigmergie Numérique comme Paradigme de Communication Indirecte

Au sein d'une EDA, la communication peut prendre des formes plus sophistiquées que la simple notification. La stigmergie numérique est un paradigme de communication indirecte particulièrement puissant et bien adapté aux SMA.<sup>20</sup> Inspiré du comportement des insectes sociaux comme les fourmis, la stigmergie est un mécanisme de coordination où les individus communiquent en modifiant leur environnement partagé. Une fourmi dépose une trace de phéromone, et cette trace (et non une communication directe) influence le comportement des fourmis suivantes.<sup>21</sup>

Dans un contexte numérique, l'environnement partagé peut être un bus d'événements, une base de données, un tableau de bord d'état ou tout autre support d'information accessible.<sup>20</sup> Les agents pratiquent la stigmergie numérique lorsqu'ils :

- Publient des événements d'état (par exemple, "Tâche\_X\_Commencée", "Ressource\_Y\_Verrouillée").
- Modifient des enregistrements dans une base de données partagée (le "blackboard pattern" est une forme de stigmergie <sup>49</sup>).
- Laissent des "marqueurs" lisibles par machine dans des artefacts partagés (par exemple, des métadonnées dans un fichier).

Ce mode de communication est extrêmement efficace pour la coordination à grande échelle. Il réduit la nécessité d'une communication directe point à point, qui peut devenir ingérable dans un système avec de

nombreux agents. Il permet à la "mémoire" du système d'être encodée dans l'environnement lui-même, permettant aux agents de réagir à l'état cumulé des actions passées sans avoir besoin de maintenir un historique complexe.<sup>21</sup> La stigmergie favorise ainsi l'auto-organisation et la coordination émergente, ce qui en fait un complément naturel à l'architecture EDA pour les SMA.<sup>21</sup>

### 3.4. Défis de l'EDA pour la Coordination : Latence, Ordre Partiel, Observabilité Globale

Si l'EDA est la clé de l'autonomie, ses caractéristiques fondamentales — le découplage et l'asynchronicité — sont aussi la source de ses plus grands défis en matière de coordination.<sup>50</sup> Ces défis ne sont pas des défauts de conception, mais des conséquences inhérentes au paradigme distribué.

- **Latence** : Dans les systèmes distribués géographiquement, la latence du réseau (WAN) est inévitable et significative, souvent de plusieurs ordres de grandeur supérieure à la latence locale.<sup>52</sup> Cette latence rend la coordination en temps réel et la garantie d'une forte cohérence extrêmement difficile. Les décisions prises par un agent sur la base d'informations peuvent être déjà obsolètes au moment où elles sont reçues par un autre agent.
- **Ordre Partiel (Partial Order)** : Dans un système distribué, il n'y a pas d'horloge globale. Chaque agent observe les événements selon sa propre ligne temporelle locale. Il est donc impossible de déterminer un ordre total et sans ambiguïté pour tous les événements du système. On ne peut établir qu'un ordre partiel, basé sur la causalité (un événement A a causé un événement B). Deux événements qui ne sont pas causalement liés sont concurrents, et leur ordre relatif peut être perçu différemment par différents observateurs.<sup>53</sup> Tenter de forcer un ordre total est coûteux et nuit à l'évolutivité.<sup>53</sup> Cette ambiguïté peut entraîner des incohérences temporelles, des conditions de concurrence (*race conditions*) et des états incorrects si elle n'est pas gérée correctement par les algorithmes de coordination.<sup>55</sup>
- **Observabilité Globale** : La combinaison du découplage, de l'asynchronicité, de la latence et de l'ordre partiel rend l'obtention d'une vue globale et cohérente de l'état du système à un instant T un problème extrêmement ardu.<sup>51</sup> Lorsqu'une défaillance se produit, il est très difficile de retracer la chaîne causale des événements à travers de multiples agents et services pour en identifier la cause première. Les journaux (*logs*) sont fragmentés et non corrélés, transformant le débogage en une tâche d'investigation complexe.<sup>51</sup>

Ces défis démontrent que le choix d'une architecture EDA n'est pas une solution miracle. Au contraire, il crée un ensemble spécifique de problèmes de coordination qui doivent être résolus par les couches supérieures du système. L'architecture ne peut être conçue indépendamment de la logique algorithmique et de la gouvernance opérationnelle. L'EDA rend l'autonomie possible, mais ce sont les algorithmes de consensus et de négociation (Partie II) et le cadre de gouvernance AgentOps (Partie III) qui rendent cette autonomie gérable et productive.

## PARTIE II : MÉCANISMES de COORDINATION et de MÉDIATION ALGORITHMIQUE

Une fois le substrat architectural en place, la question centrale devient : comment les agents interagissent-ils de manière productive? Cette partie explore la logique de coordination, les algorithmes et les protocoles qui permettent aux agents de gérer leurs interdépendances, de résoudre les conflits et de collaborer pour atteindre des objectifs collectifs. Elle s'appuie sur des fondements théoriques solides tout en reconnaissant les contraintes du monde réel, telles que l'information imparfaite et la rationalité limitée.

## Sommaire des mécanismes de Coordination et de Médiation :

**1. Protocoles d'Allocation de Ressources et de Tâches :** Ces mécanismes, souvent inspirés par des modèles économiques, visent à distribuer des ressources ou des tâches de manière efficace et décentralisée.

**1.1 Mécanismes d'Enchères :** Les enchères sont des protocoles distribués particulièrement efficaces pour l'allocation dans des systèmes ouverts où les agents agissent selon leur propre intérêt.

- **Enchère de Vickrey (Enchère au second prix sous pli scellé)**

- **Mécanisme :** Le plus offrant remporte l'objet, mais il paie le prix de la deuxième offre la plus élevée.
- **Avantage principal :** Elle est **stratégiquement compatible** (*strategy-proof*) dans les contextes à valeur privée. La meilleure stratégie pour un agent est de miser sa véritable évaluation, ce qui conduit à une allocation globalement efficace car les préférences sont révélées de manière véridique.
- **Limites documentées :** Elle est vulnérable à la **collusion** entre enchérisseurs, peut générer des revenus plus faibles pour le vendeur et perd ses propriétés théoriques dans des contextes plus complexes (p. ex., avec des agents averses au risque).

- **Enchères Combinatoires**

- **Objectif :** Gérer efficacement l'allocation lorsque les objets sont **complémentaires** (la valeur d'un ensemble est supérieure à la somme des parties) ou **substituables**.
- **Mécanisme :** Permettent aux agents d'enchérir directement sur des "paniers" ou des combinaisons d'objets.
- **Défi majeur :** Le **problème de la détermination du gagnant** (*winner determination problem*), qui consiste à trouver la combinaison d'offres qui maximise le revenu, est un problème computationnel **NP-complet**.

**1.2 Protocole du Réseau Contractuel (Contract Net Protocol - CNP) :** Un protocole de haut niveau, largement utilisé pour l'allocation de tâches distribuées.

- **Processus :**

1. **Annonce :** Un agent "manager" diffuse une annonce pour une tâche à sous-traiter.
2. **Soumission :** Les agents "contractants" potentiels évaluent l'annonce et soumettent des offres s'ils sont capables et intéressés.
3. **Attribution :** Le manager évalue les offres et attribue le "contrat" à l'agent le plus approprié.
4. **Exécution :** L'agent sélectionné exécute la tâche, et peut à son tour devenir un manager pour sous-traiter des parties de celle-ci.



- **Avantages** : Offre une méthode simple, décentralisée et flexible qui permet un équilibrage de charge naturel dans le système.

**2. Protocoles de Négociation et de Dialogue** : Ces protocoles structurent la manière dont les agents parviennent à des accords, en allant au-delà du simple échange d'offres monétaires ou de capacités.

### 2.1 Négociation Basée sur l'Argumentation (Argumentation-Based Negotiation - ABN)

Un paradigme qui enrichit la négociation en permettant l'échange d'informations justificatives.

- **Principe** : Les agents échangent non seulement des propositions, mais aussi des **arguments**. Un argument est une information visant à justifier une position ou à influencer les croyances et préférences des autres.
- **Fonctions des arguments** :
  - **Justifier** des offres pour les rendre plus acceptables.
  - **Critiquer** les offres des autres pour guider la recherche vers des solutions plus pertinentes.
  - **Modifier les croyances** d'un autre agent en lui fournissant de nouvelles informations, ce qui peut résoudre des conflits découlant de croyances erronées ou incomplètes.
- **Avantages** : Transforme la négociation d'un simple marchandage en un **dialogue rationnel**, permettant de converger vers des accords de meilleure qualité, en particulier dans des environnements complexes et incertains.

**3. Mécanismes de Consensus et de Cohérence** : Ces mécanismes sont fondamentaux pour atteindre un état où les actions et les connaissances des agents sont mutuellement consistantes, un défi majeur dans les architectures asynchrones.

**3.1 Algorithmes de Consensus Distribué** : Un problème de référence dans la coordination multi-agents.

- **Objectif** : Permettre à un groupe d'agents de s'accorder sur une valeur ou un état commun (p. ex., une heure, une vitesse, la validité d'une transaction) en se basant uniquement sur des interactions locales.
- **Fondements** : L'analyse repose sur la **théorie des graphes**, où le réseau d'interaction est modélisé comme un graphe.
- **Condition critique** : Pour qu'un consensus soit possible, le graphe doit être "**enraciné**", c'est-à-dire qu'il doit exister un chemin depuis au moins un agent ("la racine") vers tous les autres, assurant la propagation de l'information.
- **Outil d'analyse** : La **matrice Laplacienne** du graphe est un outil mathématique central pour analyser la stabilité et la vitesse de convergence de ces algorithmes.

**4. Paradigmes d'Apprentissage Adaptatif :** Ces approches permettent aux agents de développer et d'adapter leurs stratégies de coordination de manière dynamique, plutôt que de suivre des règles préprogrammées.

**4.1 Apprentissage par Renforcement Multi-Agents (MARL) :** Un paradigme puissant pour apprendre des stratégies de coordination par essais et erreurs.

- **Défis spécifiques au MARL :**
  - **Non-stationnarité :** Du point de vue de chaque agent, l'environnement est en constante évolution, car les politiques des autres agents changent au fur et à mesure qu'ils apprennent.
  - **Malédiction de la dimensionnalité :** L'espace des actions conjointes de tous les agents croît de manière exponentielle avec leur nombre.
  - **Observabilité partielle :** Chaque agent ne dispose que d'une vue locale de l'état global du système.
- **Approches de solution documentées :**
  - **Entraînement centralisé avec exécution décentralisée (CTDE) :** Un paradigme populaire où un simulateur centralisé a accès à toutes les informations pour guider l'apprentissage, mais où les agents agissent de manière décentralisée en production en utilisant uniquement leurs observations locales.
  - **Décomposition de la fonction de valeur :** Des techniques comme **VDN (Value-Decomposition Networks)** et **QMIX** qui tentent de décomposer la fonction de valeur globale de l'équipe en fonctions de valeur individuelles plus simples à apprendre.

## Chapitre 4 : Fondements Théoriques de la Coordination Agentique

Avant d'examiner des protocoles spécifiques, il est essentiel de comprendre les cadres théoriques qui sous-tendent la conception de toute interaction stratégique dans un SMA. La théorie des jeux et la conception de mécanismes fournissent le langage et les outils mathématiques pour analyser et façonner ces interactions.

### 4.1. Théorie des Jeux et Analyse des Interactions Stratégiques

La théorie des jeux est l'étude mathématique de la prise de décision stratégique, où le résultat pour chaque agent dépend des choix de tous les autres.<sup>26</sup> Dans le contexte des SMA, elle permet de formaliser les interactions en traitant les agents comme des "joueurs" stratégiques dont les choix sont interdépendants.<sup>26</sup> Les concepts fondamentaux incluent :

- **Joueurs :** Les agents participant à l'interaction.<sup>33</sup>
- **Stratégies :** L'ensemble des actions qu'un agent peut entreprendre.<sup>33</sup>
- **Utilité (ou Paiement) :** Une fonction qui quantifie la préférence d'un agent pour un résultat donné. Le paiement d'un agent dépend du profil de stratégies choisi par tous les joueurs.<sup>33</sup>

La théorie des jeux fournit des outils pour modéliser la tension inhérente entre la coopération et la compétition qui existe dans de nombreux SMA.<sup>26</sup> Les interactions peuvent être classées en jeux à somme nulle (purement

compétitifs), jeux coopératifs (objectifs alignés) ou jeux à motifs mixtes (le plus courant), où les agents doivent collaborer tout en poursuivant leurs propres intérêts.<sup>26</sup>

Un concept de solution central est l'**Équilibre de Nash**. Un profil de stratégies est un équilibre de Nash si aucun joueur ne peut améliorer son propre paiement en changeant unilatéralement sa stratégie, étant donné que les stratégies des autres joueurs restent inchangées.<sup>33</sup> C'est un état stable d'où aucune défection individuelle n'est profitable. L'identification de tels équilibres est cruciale pour prédire le comportement probable d'un système d'agents rationnels et pour concevoir des systèmes qui convergent vers des résultats souhaitables.<sup>58</sup>

#### 4.2. Conception de Mécanismes (*Mechanism Design*) et Allocation de Ressources

Si la théorie des jeux analyse les résultats de "jeux" donnés, la conception de mécanismes, souvent appelée "théorie des jeux inverse", s'attaque au problème inverse : comment concevoir les règles du jeu pour qu'une issue souhaitable au niveau du système (par exemple, une allocation de ressources efficace ou équitable) émerge, même lorsque les agents participants sont égoïstes et agissent pour maximiser leur propre utilité.<sup>59</sup>

Dans le contexte de l'allocation de ressources, un mécanisme définit les règles par lesquelles les agents déclarent leurs besoins ou leurs capacités (leurs "types" privés), et comment les ressources sont ensuite distribuées sur la base de ces déclarations.<sup>59</sup> L'objectif est de concevoir un mécanisme qui soit **stratégiquement compatible** (*strategy-proof*), où la meilleure stratégie pour chaque agent est de révéler honnêtement ses informations privées. Cela garantit que le mécanisme peut prendre des décisions basées sur des informations véridiques, conduisant à des résultats optimaux pour le système, tels que l'efficacité de Pareto (où personne ne peut être mieux loti sans que quelqu'un d'autre ne le soit moins) ou le max-min (maximiser l'utilité du participant le moins bien loti).<sup>59</sup> La conception de mécanismes est fondamentale pour créer des protocoles d'enchères, de vote et d'allocation de tâches qui fonctionnent de manière fiable dans des systèmes distribués.

#### 4.3. Le Défi de la Rationalité Limitée et de l'Information Imparfaite dans les SMA

Les modèles théoriques classiques reposent souvent sur l'hypothèse d'agents parfaitement rationnels disposant d'une information complète. Cependant, dans la plupart des systèmes du monde réel, ces hypothèses sont violées, ce qui pose un défi majeur.<sup>61</sup>

- **Rationalité Limitée (Bounded Rationality)** : Ce concept, introduit par Herbert Simon, reconnaît que les agents réels (qu'ils soient humains ou logiciels complexes) ont des capacités cognitives, des ressources de calcul et un temps limité pour prendre des décisions.<sup>17</sup> Au lieu de trouver la solution optimale, ils cherchent une solution "satisfaisante" ou "assez bonne" compte tenu de leurs contraintes. Ils utilisent des heuristiques et des raccourcis mentaux pour simplifier des problèmes complexes.<sup>17</sup>
- **Information Imparfaite** : Les agents opèrent généralement avec une connaissance incomplète et incertaine de l'environnement et des autres agents. Ils peuvent ne pas connaître les capacités, les préférences ou les stratégies futures des autres, voire ignorer leur existence.<sup>62</sup> De plus, dans un environnement dynamique où tous les agents apprennent et adaptent leurs stratégies simultanément, l'environnement devient **non stationnaire** du point de vue de chaque agent. L'action optimale d'aujourd'hui pourrait ne plus l'être demain, car les autres auront changé leur comportement.<sup>62</sup>

Ces deux facteurs combinés ont des implications profondes. L'efficacité des modèles basés sur l'équilibre de Nash, qui supposent une rationalité parfaite et une connaissance commune, diminue lorsque les agents se comportent de manière sous-optimale ou imprévisible.<sup>61</sup> Cela crée un fossé entre la théorie élégante et la pratique désordonnée. La conception de mécanismes de coordination robustes ne peut donc pas se contenter de viser un équilibre théorique ; elle doit être résiliente aux comportements sous-optimaux et adaptative face à un environnement non stationnaire. C'est ce qui motive le développement de protocoles plus flexibles comme la négociation argumentative (qui permet de corriger les fausses croyances) et de systèmes d'apprentissage comme le MARL, qui sont explicitement conçus pour faire face à la non-stationnarité, ainsi que la nécessité d'un cadre de gouvernance (AgentOps) capable de détecter et d'atténuer les comportements irrationnels ou désalignés.

## Chapitre 5 : Protocoles de Négociation et d'Allocation

La négociation est un processus d'interaction fondamental par lequel les agents parviennent à des accords mutuellement acceptables sur la répartition de ressources rares ou la coordination de leurs actions.<sup>3</sup> Ce chapitre examine plusieurs protocoles concrets qui structurent ces interactions, allant des mécanismes de marché comme les enchères aux protocoles de délégation de tâches et aux dialogues argumentatifs plus complexes.

### 5.1. Mécanismes d'Enchères (Vickrey, Combinatoires) pour l'Allocation Dynamique

Les enchères sont des mécanismes distribués, efficaces et préservant l'autonomie pour l'allocation de tâches et de ressources dans les SMA.<sup>64</sup> Elles fonctionnent bien dans des systèmes ouverts composés d'agents intéressés par leur propre gain.

- **L'Enchère de Vickrey (Enchère au second prix sous pli scellé)** : Dans cette enchère, le plus offrant remporte l'objet, mais paie le prix de la deuxième offre la plus élevée.<sup>64</sup> Sa propriété la plus célèbre est qu'elle est **stratégiquement compatible** dans les enchères à valeur privée (où la valeur d'un objet pour un enchérisseur est indépendante des évaluations des autres). La stratégie dominante pour un agent est de miser sa véritable évaluation.<sup>64</sup> Cela présente deux avantages théoriques majeurs : les agents révèlent leurs préférences de manière véridique, ce qui permet une allocation globalement efficace, et ils n'ont pas besoin de gaspiller des ressources à spéculer sur le comportement des autres. Cependant, l'enchère de Vickrey souffre de limitations importantes qui restreignent son application pratique : elle est vulnérable à la collusion des enchérisseurs, peut générer des revenus plus faibles pour le vendeur que d'autres formats, et perd sa propriété de révélation de la vérité dans des contextes plus réalistes (valeurs non privées, agents averses au risque).<sup>64</sup>
- **Enchères Combinatoires** : Lorsque les objets mis aux enchères sont complémentaires (la valeur d'un ensemble est supérieure à la somme des valeurs de ses parties) ou substituables, les enchères séquentielles simples sont inefficaces. Les enchères combinatoires permettent aux agents d'enchérir sur des "paniers" ou des combinaisons d'objets.<sup>66</sup> Cela résout le "risque d'exposition" (le danger de remporter un sous-ensemble incomplet d'objets à un prix trop élevé) mais introduit un défi computationnel majeur : le problème de la détermination du gagnant (*winner determination problem*), qui consiste à trouver l'ensemble d'offres qui maximise les revenus du vendeur, est NP-complet dans le cas général.<sup>65</sup>

Le tableau suivant compare les protocoles d'enchères classiques sur des dimensions clés, en s'appuyant sur l'analyse approfondie de Sandholm.<sup>65</sup>

Caractéristique	Anglaise (Ouvverte, Ascendante)	Hollandaise (Ouvverte, Descendante)	1er Prix (Scellée)	Vickrey (2e Prix, Scellée)
<b>Revenu attendu (agents averses au risque)</b>	Plus faible	<b>Plus élevé</b>	<b>Plus élevé</b>	Plus faible
<b>Révélation de la vérité (valeur privée)</b>	Oui (stratégie dominante)	Non	Non	<b>Oui (stratégie dominante)</b>
<b>Révélation de la vérité (valeur commune)</b>	Non (malédiction du vainqueur)	Non	Non	Non (malédiction du vainqueur)
<b>Vulnérabilité à la collusion</b>	Élevée (facile à appliquer)	Modérée	Modérée	Modérée (peut s'auto-appliquer)
<b>Vulnérabilité à un commissaire-priseur menteur</b>	Non	Non	Non	<b>Élevée</b>
<b>Révélation d'informations privées</b>	Partielle (seuil de sortie)	Faible	Faible	<b>Élevée</b> (révélation de la valeur)

## 5.2. Le Protocole *Contract Net* (CNP) pour la Délégation de Tâches Distribuées

Le Protocole du Réseau Contractuel (CNP) est un protocole de négociation de haut niveau largement utilisé pour l'allocation de tâches dans les systèmes distribués.<sup>9</sup> Il s'inspire de la métaphore d'un marché de contrats et se déroule en plusieurs étapes :

1. **Annonce de la tâche** : Un agent ayant une tâche à sous-traiter, le "manager", diffuse une annonce de tâche à d'autres agents. Cette annonce spécifie la tâche à accomplir.<sup>10</sup>
2. **Soumission d'offres (Bidding)** : Les agents capables d'exécuter la tâche, les "contractants" potentiels, évaluent l'annonce. S'ils sont intéressés et capables, ils soumettent une offre au manager. L'offre indique leur aptitude à réaliser la tâche.<sup>9</sup>
3. **Attribution du contrat** : Le manager évalue les offres reçues et sélectionne-le ou les contractants les plus appropriés. Il attribue ensuite le "contrat" à l'agent choisi en lui envoyant un message d'attribution.<sup>10</sup>
4. **Exécution de la tâche** : Le contractant sélectionné exécute la tâche. Il peut à son tour devenir un manager et sous-traiter des parties de la tâche, créant ainsi une hiérarchie de contrats dynamique.<sup>68</sup>

Le CNP offre une méthode simple, décentralisée et flexible pour l'allocation dynamique des tâches, ce qui permet un équilibrage de charge naturel dans le système.<sup>9</sup> Il a été adapté et étendu au fil des ans pour inclure

des stratégies de négociation plus complexes et pour s'appliquer à des domaines variés comme la logistique ou la gestion de la chaîne d'approvisionnement.<sup>10</sup>

### 5.3. Négociation Argumentative (*Argumentation-based Negotiation*) et Résolution de Conflits Sémantiques

Les mécanismes de négociation traditionnels, qu'ils soient basés sur les enchères ou le CNP, se concentrent principalement sur l'échange d'offres. Cependant, dans de nombreuses situations complexes, cela ne suffit pas. La Négociation Basée sur l'Argumentation (ABN) est un paradigme plus riche qui permet aux agents d'échanger non seulement des propositions, mais aussi des **arguments**.<sup>3</sup> Un argument est une information qui vise à justifier une position ou à influencer les croyances, les préférences ou les intentions d'un autre agent.<sup>3</sup>

L'ABN est particulièrement utile pour surmonter les limitations des approches classiques, notamment lorsque les agents opèrent avec une information incomplète ou des préférences mal définies.<sup>70</sup> En échangeant des arguments, les agents peuvent :

- **Justifier leurs offres** : Expliquer *pourquoi* une offre a été faite peut la rendre plus acceptable.
- **Critiquer les offres des autres** : Un agent peut expliquer pourquoi il ne peut pas accepter une offre, ce qui permet à l'autre partie de formuler une contre-offre plus pertinente et d'éviter une recherche inefficace dans l'espace des accords possibles.<sup>3</sup>
- **Modifier les croyances et les préférences** : Un argument peut fournir de nouvelles informations qui amènent un agent à réviser ses croyances sur le monde et, par conséquent, ses préférences sur les résultats possibles. Cela est essentiel pour résoudre les conflits qui ne sont pas de simples désaccords sur l'utilité, mais qui découlent de croyances erronées ou incomplètes.<sup>70</sup>
- **Résoudre les conflits sémantiques** : Lorsque les agents utilisent des ontologies ou des vocabulaires différents, des conflits sémantiques peuvent survenir. L'argumentation fournit un cadre pour que les agents puissent débattre de la signification des termes, aligner leurs compréhensions et parvenir à un accord fondé sur une sémantique partagée.

L'ABN transforme la négociation d'un simple processus de marchandage en un dialogue rationnel, permettant aux agents de converger vers des accords de meilleure qualité et plus robustes, en particulier dans des environnements complexes et incertains.<sup>4</sup>

## Chapitre 6 : Consensus et Cohérence Collective

Au-delà de l'allocation de ressources et de la délégation de tâches, un défi fondamental pour les SMA est d'atteindre une cohérence collective, c'est-à-dire un état où les actions et les états des agents sont mutuellement consistants et alignés vers un objectif global. Ce chapitre explore les mécanismes algorithmiques permettant d'atteindre le consensus, de gérer la cohérence dans des architectures asynchrones, et de former des structures collaboratives dynamiques.

### 6.1. Algorithmes de Consensus Distribué adaptés aux SMA

Le problème du consensus est un problème "de référence" dans l'étude de la coordination multi-agents.<sup>46</sup> Il consiste à concevoir un protocole distribué qui permet à un groupe d'agents de s'accorder sur une valeur ou un état commun (par exemple, la vitesse d'un essaim de drones, l'heure dans un réseau de capteurs, ou la validité



d'une transaction dans une blockchain) en se basant uniquement sur des interactions locales.<sup>72</sup>

L'analyse de ces algorithmes repose de manière cruciale sur la **théorie des graphes**. Le réseau d'interaction des agents est modélisé comme un graphe, où les agents sont les nœuds et les liens de communication sont les arêtes.<sup>46</sup> La capacité du système à atteindre le consensus est directement liée aux propriétés de connectivité de ce graphe. Un résultat fondamental est que pour qu'un consensus soit possible, le graphe d'interaction doit être **enraciné**, ce qui signifie qu'il existe un chemin dirigé d'au moins un agent (la racine) vers tous les autres agents, assurant ainsi que l'information peut se propager à l'ensemble du réseau.<sup>46</sup>

La **matrice Laplacienne** du graphe est un outil mathématique central pour analyser la dynamique de consensus. Pour un algorithme de consensus continu de base, la dynamique des états du système  $x(t)$  peut être décrite par l'équation différentielle  $x'(t) = -L[A]x(t)$ , où  $L[A]$  est la matrice Laplacienne. Les propriétés des valeurs propres de  $L[A]$  déterminent la stabilité et la vitesse de convergence vers le consensus.<sup>46</sup> Des algorithmes plus sophistiqués ont été développés pour gérer des topologies de réseau qui varient dans le temps, des retards de communication et des dynamiques d'agents plus complexes.<sup>46</sup>

## 6.2. Gestion de la Cohérence Éventuelle (*Eventual Consistency*) dans un Contexte EDA

Dans un système distribué piloté par les événements (EDA), garantir une cohérence forte (où toutes les copies des données sont identiques à tout moment) est souvent impossible ou prohibitivement coûteux en raison de la latence du réseau (théorème CAP).<sup>11</sup> L'alternative est la **cohérence éventuelle**, un modèle qui garantit que si aucune nouvelle mise à jour n'est effectuée sur une donnée, toutes les répliques finiront par converger vers la même valeur.<sup>11</sup>

Ce modèle est particulièrement bien adapté aux SMA fonctionnant sur une EDA. Les agents peuvent opérer sur leurs vues locales des données, qui peuvent être temporairement désynchronisées. La cohérence est atteinte de manière asynchrone à mesure que les événements se propagent dans le système. La gestion de la cohérence éventuelle repose sur des infrastructures robustes, comme les brokers d'événements (par exemple, Apache Kafka), qui agissent comme un journal immuable et une source unique de vérité pour les événements.<sup>49</sup> Ces systèmes garantissent que les événements ne sont pas perdus et sont livrés de manière fiable aux agents consommateurs. En cas de défaillance, un agent peut se reconnecter et "rattraper" les événements manqués en rejouant le journal à partir de sa dernière position connue, assurant ainsi qu'il finira par atteindre un état cohérent avec le reste du système.<sup>49</sup>

## 6.3. Formation de Coalitions et Prise de Décision Collective

Une forme dynamique de coordination est la formation de coalitions. C'est un processus par lequel des agents autonomes et intéressés par leur propre gain forment des groupes ou des alliances temporaires pour collaborer sur des tâches qui sont trop complexes ou coûteuses pour être réalisées individuellement.<sup>75</sup> La formation de coalitions est un mécanisme d'auto-organisation qui permet au système de s'adapter dynamiquement à la charge de travail et à la disponibilité des ressources.

Un défi important dans ce domaine est la conception d'algorithmes qui permettent la formation de **coalitions chevauchantes** (*overlapping coalitions*). La plupart des algorithmes traditionnels supposent qu'un agent ne peut

appartenir qu'à une seule coalition à la fois. Cette restriction est inefficace, car elle empêche un agent de mettre à profit ses différentes ressources ou compétences dans plusieurs collaborations simultanées. Permettre des coalitions chevauchantes conduit à une allocation plus efficace des ressources de l'ensemble du système, mais complique la conception des mécanismes de formation et de stabilité.<sup>75</sup>

#### 6.4. Apprentissage par Renforcement Multi-Agents (MARL) pour la Coordination Adaptative

Pour que les SMA fonctionnent dans des environnements dynamiques et incertains, leurs stratégies de coordination ne peuvent pas être entièrement préprogrammées. L'Apprentissage par Renforcement Multi-Agents (MARL) est un paradigme puissant qui permet aux agents d'apprendre des stratégies de coordination efficaces par essais et erreurs, en interagissant avec leur environnement et les uns avec les autres.<sup>16</sup>

Cependant, le MARL introduit une série de défis qui ne sont pas présents dans l'apprentissage par renforcement à agent unique <sup>16</sup> :

- **Non-stationnarité** : Du point de vue de chaque agent, l'environnement est non stationnaire car les politiques des autres agents changent au fur et à mesure qu'ils apprennent. L'optimalité d'une action dépend des actions des autres, qui sont elles-mêmes en constante évolution.<sup>16</sup>
- **Malédiction de la dimensionnalité** : L'espace d'actions conjoint de tous les agents croît de manière exponentielle avec le nombre d'agents, ce qui rend l'exploration et l'apprentissage extrêmement difficiles.<sup>16</sup>
- **Observabilité partielle** : Chaque agent n'a généralement accès qu'à une observation locale de l'état global du système, ce qui complique la prise de décision coordonnée.<sup>16</sup>
- **Évolutivité (Scalability)** : À mesure que le nombre d'agents augmente, la surcharge de communication et de calcul peut devenir prohibitive.<sup>16</sup>

Pour relever ces défis, la recherche en MARL a développé plusieurs approches. Le paradigme de l'**entraînement centralisé avec exécution décentralisée (CTDE)** est une approche courante : pendant la phase d'apprentissage, un simulateur centralisé a accès aux informations de tous les agents pour guider l'apprentissage, mais pendant l'exécution, chaque agent utilise sa politique locale apprise en se basant uniquement sur ses observations locales. Des techniques comme la **décomposition de la fonction de valeur** (par exemple, VDN, QMIX) tentent de décomposer la fonction de valeur globale de l'équipe en fonctions de valeur individuelles pour les agents, simplifiant ainsi le problème d'apprentissage.<sup>16</sup> Le MARL reste un domaine de recherche actif et essentiel pour le développement de SMA véritablement adaptatifs.

### PARTIE III : AGENTOPS : GOUVERNANCE OPÉRATIONNELLE DES SYSTÈMES NON DÉTERMINISTES

L'architecture et les algorithmes fournissent les fondations et la logique pour la coordination agentique. Cependant, une fois déployé, un système multi-agents autonome se comporte comme un système vivant, non déterministe, dont les interactions peuvent produire des résultats inattendus. Les cadres opérationnels traditionnels, conçus pour des logiciels prévisibles, sont mal équipés pour gérer cette nouvelle classe de systèmes. Cette partie introduit l'AgentOps comme le pilier de gouvernance indispensable pour assurer la fiabilité, la sécurité et l'alignement des SMA en production.

## Chapitre 7 : L'Impératif de l'AgentOps pour la Coordination

La transition vers des systèmes agentiques ne représente pas seulement un changement technologique, mais aussi un changement de paradigme opérationnel. La nature même de ces systèmes rend les approches existantes, comme DevOps et MLOps, insuffisantes.

### 7.1. Limites de DevOps et MLOps face au Comportement Émergent et Non Déterministe

Les pratiques DevOps et MLOps ont été développées pour gérer le cycle de vie de systèmes logiciels dont le comportement est, dans une large mesure, **déterministe**. Dans ces paradigmes, une déviation par rapport au comportement attendu est considérée comme un bug ou une dérive du modèle, qui doit être corrigée pour restaurer la prévisibilité.<sup>77</sup>

Les systèmes agentiques, en revanche, sont fondamentalement **non déterministes** et caractérisés par un **comportement émergent**.<sup>6</sup> Leur valeur réside précisément dans leur capacité à s'adapter et à générer des solutions nouvelles et non explicitement programmées en réponse à des environnements dynamiques.<sup>78</sup> Les principales limitations des approches traditionnelles sont les suivantes :

- **Gestion du non-déterminisme** : MLOps se concentre sur le cycle de vie du *modèle* (entraînement, déploiement, surveillance de la dérive des données et du concept). Il n'est pas conçu pour gérer le cycle de vie du *comportement* d'un agent, qui est probabiliste et dépend du contexte en temps réel.<sup>78</sup> Tester un tel système ne consiste plus à vérifier une sortie unique et correcte, mais à valider un éventail de comportements acceptables.<sup>79</sup>
- **Complexité des interactions** : MLOps traite généralement les modèles comme des composants isolés. Il ne dispose pas des outils nécessaires pour surveiller, déboguer et analyser les interactions complexes et les dépendances entre de multiples agents autonomes, où les défaillances peuvent être le résultat de dynamiques de groupe plutôt que de la défaillance d'un seul agent.<sup>5</sup>
- **Comportement émergent** : Les boucles de rétroaction entre agents peuvent conduire à des comportements collectifs imprévus, qu'ils soient bénéfiques ou néfastes. DevOps et MLOps n'ont pas de mécanismes pour anticiper, surveiller ou contrôler ces phénomènes émergents, qui sont une caractéristique fondamentale des SMA et non une anomalie à corriger.<sup>6</sup>

Cette inadéquation fondamentale crée un impératif pour un nouveau cadre opérationnel. Le passage de MLOps à AgentOps est une évolution nécessaire, marquant un changement de focus de la gestion d'artefacts prévisibles (code, modèles) à la gouvernance de comportements imprévisibles (interactions d'agents, stratégies émergentes).

### 7.2. Définition de l'AgentOps : Cadre de Gestion du Cycle de Vie et de Gouvernance Comportementale

**AgentOps** (Agent Operations) est la discipline émergente qui englobe les pratiques, les outils et les processus pour l'opérationnalisation, la surveillance, le débogage, la sécurité et la gouvernance du cycle de vie complet des systèmes d'IA agentiques.<sup>5</sup> Il s'agit de "DevOps pour les agents d'IA".<sup>6</sup>

AgentOps étend les concepts de MLOps pour relever les défis uniques posés par les SMA <sup>5</sup> :

- **Déploiement et Orchestration** : Gestion du déploiement coordonné de multiples agents et de leurs

interactions.<sup>6</sup>

- **Observabilité et Surveillance** : Suivi des performances des agents, de leurs processus de décision, de leur consommation de ressources (par exemple, les jetons LLM) et de leurs interactions.<sup>6</sup>
- **Gouvernance et Sécurité** : Définition des permissions, gestion des identités des agents, création de pistes d'audit pour leurs actions et application de garde-fous éthiques et réglementaires.<sup>6</sup>
- **Gestion des Prompts** : Contrôle de version et tests A/B pour les instructions qui définissent le comportement des agents.<sup>6</sup>
- **Gestion du Comportement Émergent** : Le défi théorique et pratique de traiter les résultats imprévisibles et non déterministes qui peuvent découler des interactions autonomes.<sup>5</sup>

### 7.3. Le Rôle de la Gouvernance Opérationnelle dans la Fiabilisation de la Coordination

La gouvernance opérationnelle fournie par AgentOps est ce qui rend la coordination autonome fiable et digne de confiance. Sans un cadre de gouvernance robuste, le déploiement de SMA pour des tâches critiques comporte des risques inacceptables de défaillances en cascade, de comportements désalignés et de vulnérabilités de sécurité.<sup>81</sup>

Le rôle de la gouvernance AgentOps est de :

- **Assurer l'alignement** : Veiller à ce que les actions des agents, individuelles et collectives, restent alignées sur les objectifs commerciaux et les contraintes éthiques, même lorsque les stratégies évoluent.
- **Garantir la sécurité** : Protéger le système contre les menaces internes (par exemple, un agent défaillant) et externes (par exemple, des attaques adverses), en gérant les identités et les permissions des agents.<sup>82</sup>
- **Fournir une traçabilité** : Créer des pistes d'audit complètes qui permettent de comprendre *pourquoi* un système a pris une certaine décision, ce qui est crucial pour la responsabilité et le débogage.
- **Gérer les risques** : Identifier, surveiller et atténuer les risques associés au comportement émergent et non déterministe, en mettant en place des garde-fous et des mécanismes d'escalade vers une intervention humaine si nécessaire.<sup>5</sup>

En somme, AgentOps fournit la superstructure de contrôle qui permet de déployer en toute confiance des systèmes dont le comportement de bas niveau est intrinsèquement imprévisible.

## Chapitre 8 : Observabilité et Surveillance Comportementale

L'observabilité est la capacité de déduire l'état interne d'un système à partir de ses sorties externes. Dans les SMA, où l'état interne est distribué et les interactions complexes, l'observabilité devient un défi de premier ordre et une fonction centrale d'AgentOps. Il ne s'agit plus seulement de surveiller des métriques de performance, mais de comprendre le comportement dynamique du système.

### 8.1. Défis de l'Observabilité dans les Systèmes Décentralisés et Asynchrones

Comme établi dans la Partie I, les architectures décentralisées et asynchrones qui permettent l'autonomie des agents créent des obstacles fondamentaux à l'observabilité.<sup>51</sup> L'absence d'état global cohérent, l'ordre partiel des événements et la communication découplée rendent extrêmement difficile la reconstruction de la chaîne causale qui a conduit à un comportement ou à une défaillance spécifique.<sup>56</sup> Obtenir une image complète et

fidèle de ce qui se passe dans le système à un moment donné est un problème non trivial qui nécessite des outils et des approches spécialisés.<sup>51</sup>

## 8.2. Traçage des Interactions et Analyse des Flux de Coordination

Pour surmonter ces défis, le concept d'**Observabilité Agentique** a émergé. Il s'agit de la surveillance structurée des comportements, des décisions et des interactions des agents d'IA au fil du temps.<sup>84</sup> Plutôt que de se limiter à des métriques agrégées, l'observabilité agentique se concentre sur le traçage de bout en bout des flux de travail.

Cela implique de capturer et de corréler des informations détaillées à chaque étape du processus de décision d'un agent, y compris :

- Les entrées reçues (prompts, événements).
- Le "raisonnement" interne ou la "chaîne de pensée" de l'agent.
- Les appels à des outils externes (API, bases de données).
- Les messages échangés avec d'autres agents.
- Les sorties ou actions finales.<sup>5</sup>

Des frameworks comme LangGraph, qui modélisent les interactions comme des graphes d'états, ou LlamaIndex Workflows, qui adoptent une approche pilotée par les événements, sont spécifiquement conçus pour fournir ce niveau de visibilité granulaire dans les flux de travail multi-agents.<sup>85</sup> Ce traçage détaillé est essentiel pour le débogage, l'analyse des causes profondes et l'optimisation des processus de coordination.

## 8.3. Détection d'Anomalies Comportementales et de Dérives Stratégiques (*Behavioral Drift*)

La surveillance dans le contexte AgentOps va au-delà de la détection de pannes techniques. Elle doit également identifier les anomalies comportementales. Une **dérive comportementale** se produit lorsqu'un agent ou un groupe d'agents commence à adopter des stratégies ou des comportements qui s'écartent de leurs objectifs initiaux ou des normes attendues, même si le système continue de fonctionner techniquement.

Cela peut se manifester de plusieurs manières :

- Un agent ne respecte plus son rôle et empiète sur les responsabilités d'un autre.
- Le système entre dans une boucle de comportement répétitif et inefficace.
- Une stratégie émergente, initialement bénéfique, devient nuisible dans un nouveau contexte.

Les plateformes AgentOps fournissent des tableaux de bord, des capacités de relecture de session et des alertes pour aider les opérateurs humains à repérer ces dérives subtiles qui ne seraient pas détectées par des moniteurs de performance traditionnels.<sup>5</sup> La détection précoce de ces anomalies est cruciale pour maintenir l'alignement et la fiabilité du système à long terme.

## 8.4. Métriques de Performance de la Coordination Collective

Pour évaluer quantitativement la performance d'un SMA, un ensemble de métriques spécifiques est nécessaire. Ces métriques doivent capturer à la fois l'efficacité individuelle des agents et la qualité de la coordination

collective. En s'appuyant sur des cadres d'évaluation robustes <sup>84</sup>, les métriques clés incluent :

- **Taux de succès des tâches** : Le pourcentage de tâches ou d'objectifs globaux atteints avec succès.
- **Temps de réponse / Latence** : Le temps écoulé entre le début d'une tâche et sa complétion.
- **Coût des ressources** : La consommation de ressources, comme les jetons d'API pour les LLM, la puissance de calcul ou la bande passante.
- **Qualité des résultats** :
  - **Métrique d'hallucination** : La fréquence des sorties factuellement incorrectes ou absurdes.
  - **Métrique de toxicité** : La présence de contenu nuisible, offensant ou biaisé dans les réponses des agents.
- **Efficacité de la coordination** :
  - **Score de confiance inter-agents** : Une mesure de la fiabilité des agents individuels au sein du système.
  - **Analyse de la propagation des erreurs** : La capacité à tracer comment les erreurs d'un agent impactent les autres.
- **Satisfaction des utilisateurs (CSAT/NPS)** : Le retour d'information humain sur la performance perçue, la fiabilité et l'utilité globale du système.

Ces métriques fournissent une base quantitative pour l'évaluation continue, l'optimisation et l'amélioration des systèmes agentiques en production.

## Chapitre 9 : Taxonomie des Modes de Défaillance et Robustesse du Maillage

Un système robuste est un système qui peut tolérer les défaillances et continuer à fonctionner. Pour construire des maillages agentiques robustes, il est essentiel de comprendre et de catégoriser systématiquement leurs modes de défaillance potentiels. Ces défaillances peuvent survenir à différents niveaux du système, de l'infrastructure physique à la logique algorithmique, jusqu'aux dynamiques comportementales complexes.

### 9.1. Défaillances Architecturales (Communication, Latence)

Ces défaillances sont liées au substrat physique et logiciel sur lequel le maillage opère. Elles ne sont pas spécifiques aux agents mais ont un impact direct sur leur capacité à se coordonner.

- **Défaillances de communication** : Les pannes de réseau, les partitions de réseau (où des groupes d'agents deviennent incapables de communiquer entre eux) ou les défaillances du broker d'événements peuvent isoler les agents et empêcher la coordination.
- **Latence excessive** : Des retards de communication importants peuvent entraîner des timeouts, des décisions basées sur des informations obsolètes et la rupture des protocoles de coordination qui ont des contraintes temporelles.
- **Perte de messages** : Bien que les brokers d'événements modernes soient conçus pour être fiables, des erreurs de configuration ou des défaillances catastrophiques peuvent entraîner la perte d'événements, brisant ainsi les chaînes de causalité et conduisant à des états incohérents.

### 9.2. Défaillances Algorithmiques (Non-convergence, Oscillations, Impasses)

Ces défaillances se produisent au niveau de la logique de coordination elle-même. Les algorithmes, même s'ils sont théoriquement corrects, peuvent échouer dans des conditions pratiques.



- **Non-convergence** : Les algorithmes de consensus peuvent ne pas parvenir à un accord si les conditions de connectivité du réseau ne sont pas remplies ou si des messages sont perdus.
- **Oscillations** : Dans les systèmes d'apprentissage (MARL), les agents peuvent entrer dans des cycles où ils changent continuellement de stratégie en réponse les uns aux autres, sans jamais converger vers un équilibre stable.
- **Impasses (Deadlocks)** : Dans les protocoles de négociation ou d'allocation de ressources, les agents peuvent se retrouver dans une situation où chacun attend une action de l'autre, sans qu'aucun ne puisse progresser.
- **Allocation inefficace** : Des mécanismes d'enchères mal conçus peuvent conduire à des allocations de ressources sous-optimales, en particulier lorsque les hypothèses sous-jacentes (par exemple, la valeur privée) ne sont pas respectées.

### 9.3. Défaillances Comportementales (Dérive d'Alignement, Chaos Agentique, Risques Systémiques)

C'est la catégorie de défaillances la plus complexe et la plus spécifique aux SMA. Elles découlent des interactions dynamiques et non déterministes entre les agents. Des taxonomies empiriques de classement.

La **Taxonomie des Défaillances des Systèmes Multi-Agents (MAST)** est un cadre fondé sur l'analyse de systèmes réels, qui organise les défaillances en trois catégories principales <sup>86</sup> :

Catégorie Principale	Modes de Défaillance Spécifiques	Description
<b>1. Problèmes de Spécification</b>	1.1. Non-respect de la spécification de la tâche	Le système ne respecte pas les contraintes ou les exigences de la tâche.
(Défauts de conception du système)	1.2. Non-respect de la spécification du rôle	Un agent n'adhère pas à son rôle défini, se comportant comme un autre agent.
	1.3. Répétition d'étapes	Réitération inutile d'étapes déjà terminées, provoquant des retards.
	1.4. Perte de l'historique de la conversation	Troncature inattendue du contexte, revenant à un état de conversation antérieur.
	1.5. Ignorance des conditions de terminaison	Le système ne reconnaît pas quand la tâche est terminée et continue inutilement.
<b>2. Désalignement Inter-Agents</b>	2.1. Réinitialisation de la conversation	Redémarrage inattendu d'un dialogue, entraînant une perte de contexte.

(Défauts de coordination des agents)	2.2. Manque de demande de clarification	Un agent n'arrive pas à demander plus d'informations face à des données ambiguës.
	2.3. Déraillement de la tâche	Déviation de l'objectif initial, conduisant à des actions non pertinentes.
	2.4. Rétention d'information	Un agent ne partage pas d'informations cruciales qu'il possède.
	2.5. Ignorance de l'entrée d'un autre agent	Ne pas tenir compte des recommandations ou des données fournies par d'autres agents.
	2.6. Inadéquation raisonnement-action	Une divergence entre le processus de raisonnement logique et les actions réellement entreprises.
<b>3. Vérification de la Tâche</b>	3.1. Terminaison prématurée	Finir une tâche avant que tous les objectifs ne soient atteints.
(Défauts de contrôle qualité)	3.2. Vérification absente ou incomplète	Omission de la vérification des résultats, permettant aux erreurs de se propager.
	3.3. Vérification incorrecte	Échec de la validation croisée des informations ou des décisions cruciales.

En complément, la taxonomie de Microsoft distingue les défaillances de **Sécurité** (perte de confidentialité, d'intégrité ou de disponibilité, comme l'empoisonnement de la mémoire d'un agent) des défaillances de **Sûreté** (*Safety*) (préjudices aux utilisateurs ou à la société, comme les biais ou les hallucinations).<sup>87</sup>

#### 9.4. Simulation et Tests d'Adversité (*Adversarial Testing*) des Protocoles de Médiation

Pour garantir la robustesse face à ces défaillances, une approche de test proactive est nécessaire. Il ne suffit pas de tester les cas d'utilisation nominaux ; il faut activement chercher à faire échouer le système pour découvrir ses vulnérabilités.

- **Tests d'Adversité** : Cette approche consiste à générer de manière automatisée des entrées difficiles, inattendues ou malveillantes pour sonder la robustesse du système.<sup>89</sup> Cela inclut l'injection d'exemples adverses (des entrées subtilement modifiées pour tromper les modèles), le *fuzz testing* (génération d'entrées aléatoires ou semi-aléatoires) et la simulation d'utilisateurs malveillants ou non coopératifs.<sup>89</sup> L'objectif est de découvrir des comportements inattendus, des biais ou des vulnérabilités de sécurité avant le déploiement.

- **Simulation** : Le déploiement direct de SMA dans des environnements de production peut être risqué. Les environnements de simulation (comme MultiAgentBench, BattleAgentBench) jouent un rôle crucial.<sup>91</sup> Ils permettent de :
  - Tester les protocoles de coordination dans des scénarios contrôlés et reproductibles.
  - Évaluer la performance du système sous des charges de stress ou dans des conditions de défaillance simulées (par exemple, pannes de réseau).
  - Observer et analyser les comportements émergents et les modes de défaillance collectifs dans un environnement sûr, sans impact sur le monde réel.<sup>83</sup>

La combinaison de la simulation et des tests d'adversité est une pratique essentielle de l'AgentOps pour valider la robustesse des protocoles de médiation et renforcer la confiance des comportements du maillage agentique.

## PARTIE IV : SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Après avoir exploré en détail les fondements architecturaux, les mécanismes algorithmiques et le cadre de gouvernance opérationnelle, cette dernière partie synthétise les arguments pour présenter une vision unifiée de la conception des systèmes multi-agents. Elle met en lumière la nécessité d'une approche holistique, introduit les concepts avancés de résilience et d'anti-fragilité comme objectifs de conception ultimes, et esquisse les contours de l'avenir de la coordination agentique.

### Chapitre 10 : Principes de Conception Holistique et Co-Design

L'analyse menée dans les parties précédentes converge vers une conclusion centrale : la construction de systèmes multi-agents robustes et évolutifs ne peut se faire en silos. L'architecture, les algorithmes et la gouvernance sont des facettes interdépendantes d'un même problème de conception.

#### 10.1. La Synergie Critique : Co-conception de l'Architecture, des Algorithmes et de la Gouvernance

La thèse fondamentale de cet essai est que la synergie entre l'architecture, la logique et la gouvernance n'est pas seulement souhaitable, mais absolument critique. Les ignorer ou les concevoir de manière isolée conduit à des systèmes intrinsèquement fragiles.<sup>31</sup>

- **Architecture sans Algorithmes** : Une architecture pilotée par les événements (EDA) fournit l'autonomie, mais sans algorithmes de coordination conçus pour gérer ses conséquences (comme l'ordre partiel et la cohérence éventuelle), le système est voué à l'incohérence et à l'échec. Un consensus qui suppose un ordre total échouera dans une EDA.
- **Algorithmes sans Architecture** : Des algorithmes de coordination sophistiqués, conçus en supposant une communication instantanée et fiable, ne pourront pas être mis à l'échelle ou fonctionneront de manière imprévisible sur une architecture distribuée et asynchrone qui ne respecte pas ces hypothèses.
- **Système sans Gouvernance** : Un système doté d'une architecture et d'algorithmes bien conçus, mais dépourvu d'un cadre de gouvernance AgentOps, reste une "boîte noire" dangereuse. Le comportement émergent et non déterministe, bien que puissant, est aussi une source de risque. Sans observabilité, surveillance comportementale et mécanismes de contrôle, il est impossible de faire confiance à un tel système pour des tâches critiques.<sup>1</sup>

Par conséquent, une approche de **co-design** est impérative. La conception doit être un processus itératif où les choix architecturaux informent les exigences algorithmiques, et où la nature non déterministe du système qui en résulte dicte les besoins en matière de gouvernance. Par exemple, le choix d'une topologie de communication (décision architecturale) contraint les types d'algorithmes de consensus qui peuvent être utilisés (décision algorithmique) et définit les points de surveillance critiques pour l'AgentOps (décision de gouvernance). La conception efficace de SMA nécessite de penser explicitement à la collaboration et de considérer la performance combinée de l'ensemble du système socio-technique, plutôt que d'optimiser les agents de manière isolée.<sup>31</sup>

## 10.2. Architecturer pour la Résilience et l'Anti-fragilité

L'objectif ultime de cette approche de co-design est de construire des systèmes qui ne sont pas seulement fonctionnels, mais qui peuvent survivre et même prospérer face à l'incertitude, aux perturbations et aux défaillances. Cela nous amène aux concepts de résilience et d'anti-fragilité.

- **Résilience** : La résilience est la capacité d'un système à absorber les perturbations, les attaques et les défaillances tout en maintenant un niveau de fonctionnement acceptable.<sup>35</sup> Dans un SMA, la résilience est obtenue grâce à des mécanismes tels que :
  - La **décentralisation**, qui évite les points uniques de défaillance.
  - La **redondance**, où plusieurs agents peuvent remplir la même fonction.
  - L'**auto-gestion** (*self-management*), qui inclut l'auto-guérison (capacité à détecter et à réparer les pannes), l'auto-configuration (adaptation de la structure) et l'auto-protection (défense contre les menaces).<sup>92</sup>
- **Anti-fragilité** : Ce concept, popularisé par Nassim Nicholas Taleb, va au-delà de la résilience.<sup>94</sup> Un système résilient *résiste* aux chocs et reste le même. Un système **anti-fragile** *bénéficie* des chocs, du stress et de la volatilité ; il s'améliore et devient plus fort suite à une perturbation.<sup>94</sup> Pour un SMA, l'anti-fragilité signifie que le système ne se contente pas de survivre à une défaillance, mais qu'il **apprend** de cet événement pour améliorer ses stratégies, sa structure ou ses mécanismes de défense, devenant ainsi plus robuste à l'avenir.<sup>92</sup> Atteindre l'anti-fragilité est l'objectif de conception le plus élevé pour les systèmes destinés à opérer dans des environnements dynamiques et contestés. Cela nécessite des boucles de rétroaction et d'apprentissage continues, où chaque anomalie et chaque défaillance sont traitées comme des opportunités d'amélioration pour le système.

## 10.3. L'Évolution Future de la Coordination Agentique : Vers une Cybernétique Organisationnelle

En regardant vers l'avenir, la convergence de l'architecture, des algorithmes et de la gouvernance dans les SMA dessine les contours d'une nouvelle discipline : une **cybernétique organisationnelle**.<sup>36</sup> La cybernétique est la science du contrôle et de la communication dans les systèmes complexes. Appliquée aux SMA, elle déplace l'accent de la programmation d'agents individuels vers la conception d'écosystèmes d'agents auto-régulés. Les tendances futures qui façonneront cette discipline incluent :

- **Structures organisationnelles avancées** : Au-delà des hiérarchies simples, les futurs SMA utiliseront des structures plus organiques et dynamiques, comme les structures holoniques (où des groupes d'agents auto-organisés, les "holons", agissent comme des entités cohérentes) et des coalitions fluides, permettant une

adaptabilité encore plus grande.<sup>96</sup>

- **Gouvernance décentralisée et confiance** : Des technologies comme la blockchain pourraient être utilisées pour créer des mécanismes de gouvernance décentralisés, des registres d'identité d'agents immuables et des contrats intelligents pour faire respecter les accords de manière transparente et sans confiance, renforçant ainsi la sécurité et la responsabilité dans les systèmes ouverts.<sup>97</sup>
- **Conscience contextuelle accrue** : Les agents deviendront de plus en plus conscients de leur contexte, capables de raisonner sur l'incertitude et de naviguer dans des environnements "ouverts" où toutes les éventualités ne peuvent être prévues.<sup>98</sup>
- **Intégration de l'IA générative et de l'AutoML** : L'IA générative améliorera la créativité et l'adaptabilité des agents, tandis que l'AutoML (apprentissage automatique automatisé) optimisera leurs processus d'apprentissage et de prise de décision, accélérant l'évolution du système.<sup>97</sup>

L'objectif ultime n'est plus de construire une machine complexe, mais de cultiver une société numérique capable d'intelligence collective, d'adaptation et d'évolution.<sup>19</sup> Le maillage agentique et l'AgentOps sont les premières étapes concrètes vers la réalisation de cette vision d'une cybernétique organisationnelle.

## Conclusion Générale

### 1. Synthèse des Apports Clés

Cet essai a entrepris une exploration approfondie du défi de la coordination dans les systèmes multi-agents autonomes, en soutenant une thèse centrale : la viabilité de ces systèmes repose sur une co-conception holistique de leur architecture, de leur logique algorithmique et de leur gouvernance opérationnelle. Les apports clés de cette analyse peuvent être synthétisés comme suit :

Premièrement, ce travail a formalisé le **Maillage Agentique (Agentic Mesh)** non seulement comme un paradigme architectural, mais aussi comme un cadre de gouvernance essentiel. En le positionnant comme l'évolution conceptuelle du Service Mesh et du Data Mesh, et en l'analysant à travers le prisme de la théorie des Systèmes Complexes Adaptatifs, nous avons démontré que ses principes fondateurs (tels que la "gouvernance de l'autonomie" et l'"observabilité universelle") sont des réponses directes et nécessaires aux propriétés intrinsèques des SMA, à savoir l'émergence, l'auto-organisation et le non-déterminisme.

Deuxièmement, l'analyse a mis en évidence la relation de causalité critique entre l'**Architecture Pilotée par Événements (EDA)** et les exigences en matière d'algorithmes et de gouvernance. Il a été démontré que l'EDA, bien qu'indispensable pour l'autonomie des agents, introduit des défis fondamentaux de latence, d'ordre partiel et d'observabilité. Cette réalité architecturale impose le besoin d'algorithmes de coordination (comme le consensus ou la gestion de la cohérence éventuelle) qui sont explicitement conçus pour fonctionner dans des conditions asynchrones, et nécessite impérativement un cadre de gouvernance, l'**AgentOps**, pour gérer l'opacité et l'imprévisibilité qui en résultent.

Troisièmement, cet essai a fourni une revue structurée des **mécanismes de coordination**, en reliant les fondements théoriques (théorie des jeux, conception de mécanismes) aux protocoles pratiques (enchères, Contract Net, négociation argumentative, MARL). L'analyse a constamment souligné le fossé entre les modèles

idéalisés basés sur une rationalité parfaite et les défis pratiques posés par la rationalité limitée et l'information imparfaite, justifiant ainsi le besoin de protocoles plus robustes et adaptatifs.

Enfin, en définissant l'**AgentOps** comme une discipline distincte et nécessaire, et en présentant des taxonomies de modes de défaillance (notamment MAST), ce travail a jeté les bases d'une approche rigoureuse de la gouvernance des systèmes non déterministes. Il a été argumenté que le passage de MLOps à AgentOps représente un changement de paradigme fondamental, de la gestion d'artefacts à la gouvernance de comportements.

## 2. Implications pour la Conception de Systèmes d'IA Distribués Robustes

Les conclusions de cet essai ont des implications pratiques significatives pour les architectes, les ingénieurs et les chefs de projet qui conçoivent et déploient la prochaine génération de systèmes d'IA.

L'implication la plus importante est la nécessité d'abandonner les approches de conception en silos. Un système d'IA distribué ne peut être construit en demandant à une équipe de choisir une architecture, à une autre de développer des algorithmes, et à une troisième de s'occuper des opérations. La conception doit être un processus intégré où les décisions sont prises de manière collaborative. Les architectes doivent comprendre comment leurs choix (par exemple, le type de broker d'événements) affecteront la convergence des algorithmes de consensus. Les concepteurs d'algorithmes doivent être conscients des contraintes de latence et d'ordre partiel imposées par l'infrastructure. Et les équipes opérationnelles (AgentOps) doivent être impliquées dès le début pour définir les exigences en matière d'observabilité et de contrôle.

De plus, les concepteurs doivent explicitement viser des propriétés systémiques de haut niveau comme la **résilience** et l'**anti-fragilité**. Cela signifie qu'il faut aller au-delà de la simple correction des bugs et concevoir des systèmes qui peuvent non seulement survivre aux défaillances, mais aussi en tirer des leçons pour s'améliorer. Cela implique d'intégrer des boucles d'apprentissage et d'adaptation à tous les niveaux du système, de l'agent individuel à la structure organisationnelle globale.

Enfin, la reconnaissance du SMA comme un Système Complexe Adaptatif change la nature même de l'ingénierie. L'objectif n'est plus de spécifier de manière exhaustive le comportement du système, mais de concevoir les "règles du jeu" (les protocoles d'interaction, l'environnement, les incitations) de telle sorte que le comportement global souhaité puisse **émerger** de manière fiable.

## 3. Frontières de la Recherche

Ce travail ouvre la voie à plusieurs axes de recherche futurs qui sont essentiels pour faire progresser le domaine.

- **Théories de l'Anti-fragilité pour les SMA** : Bien que le concept soit puissant, il manque encore de modèles formels et de méthodologies de conception concrètes pour intégrer l'anti-fragilité dans les SMA. Comment quantifier l'anti-fragilité? Quels types de mécanismes d'apprentissage permettent à un système de s'améliorer systématiquement à partir des chocs?
- **AgentOps et Gouvernance Automatisée** : L'AgentOps est actuellement une discipline largement humaine. Une frontière de recherche passionnante est le développement d'agents de gouvernance autonomes — des "agents de surveillance" qui peuvent automatiquement détecter les dérives comportementales,



analyser les causes profondes des défaillances et même proposer ou appliquer des reconfigurations du système pour améliorer la résilience.

- **Coordination sous Rationalité Profondément Limitée** : Les modèles actuels commencent à peine à intégrer la rationalité limitée. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour développer des protocoles de coordination qui sont robustes face à des agents dont le comportement peut être non seulement sous-optimal, mais aussi potentiellement irrationnel, biaisé ou contradictoire, en s'inspirant davantage des sciences cognitives et de l'économie comportementale.
- **Éthique et Alignement Émergents** : Si le comportement global d'un système est émergent, comment garantir que ce comportement reste aligné sur les valeurs et les normes éthiques humaines? Le problème de l'alignement de l'IA, déjà complexe pour un seul agent, acquiert une dimension entièrement nouvelle dans les SMA. La recherche sur l'"alignement émergent" sera cruciale pour le déploiement sûr de ces technologies.

En conclusion, la coordination et la médiation dans les maillages agentiques représentent l'une des frontières les plus stimulantes et les plus importantes de l'intelligence artificielle. En adoptant une approche synergique qui intègre l'architecture, la logique et la gouvernance, il est possible de surmonter les défis de la complexité décentralisée et de construire des systèmes d'IA distribués qui sont non seulement puissants, mais aussi robustes, fiables et dignes de confiance.

#### Ouvrages cités

1. Best Practices & Principles for Agent Mesh Implementations - Gravitee, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.gravitee.io/blog/best-practices-principles-for-agent-mesh-implementations>
2. Seizing the agentic AI advantage | McKinsey, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/seizing-the-agentic-ai-advantage>
3. Argumentation-based negotiation - ePrints Soton - University of ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://eprints.soton.ac.uk/258850/1/abn.pdf>
4. (PDF) Argumentation-Based Negotiation - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/2907449\\_Argumentation-Based\\_Negotiation](https://www.researchgate.net/publication/2907449_Argumentation-Based_Negotiation)
5. (PDF) LLMOps, AgentOps, and MLOps for Generative AI: A Comprehensive Review, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/393122731\\_LLMOps\\_AgentOps\\_and\\_MLOps\\_for\\_Generative\\_AI\\_A\\_Comprehensive\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/393122731_LLMOps_AgentOps_and_MLOps_for_Generative_AI_A_Comprehensive_Review)
6. RPA vs. APA (2025 Trends): A Developer's Guide to Agentic ... - AskUI, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.askui.com/blog-posts/rpa-vs-apa-agentic-automation>
7. Systems Model Series: Complexity Science - Search Help Center, dernier accès : août 13, 2025, <https://help.cabrera-research.org/systems-model-series-complexity-science>
8. Complex adaptive system - Wikipedia, dernier accès : août 13, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Complex\\_adaptive\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Complex_adaptive_system)
9. Contract net protocol – Knowledge and References - Taylor & Francis, dernier accès : août 13, 2025, [https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering\\_and\\_technology/Artificial\\_intelligence/Contract\\_net\\_protocol/](https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Artificial_intelligence/Contract_net_protocol/)
10. Mastering Contract Net Protocol in Automated Reasoning, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/contract-net-protocol-automated-reasoning-guide>
11. Eventual Consistency in Microservices and My Front Yard - Solace, dernier accès : août 13, 2025,

- <https://solace.com/blog/eventual-consistency-in-microservices/>
12. Achieve domain consistency in event-driven architectures | AWS Cloud Operations Blog, dernier accès : août 13, 2025, <https://aws.amazon.com/blogs/mt/achieve-domain-consistency-in-event-driven-architectures/>
  13. Event-driven architecture - Wikipedia, dernier accès : août 13, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Event-driven\\_architecture](https://en.wikipedia.org/wiki/Event-driven_architecture)
  14. Emergence of Fair Leaders via Mediators in Multi-Agent Reinforcement Learning - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/html/2508.02421v1>
  15. Stackelberg equilibrium with social optima in linear-quadratic ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://www.aims sciences.org/article/doi/10.3934/mcrf.2023024>
  16. A Review of Multi-Agent Reinforcement Learning Algorithms - MDPI, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/820>
  17. Bounded rationality - Wikipedia, dernier accès : août 13, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Bounded\\_rationality](https://en.wikipedia.org/wiki/Bounded_rationality)
  18. Bounded Rationality - Stanford Encyclopedia of Philosophy, dernier accès : août 13, 2025, <https://plato.stanford.edu/entries/bounded-rationality/>
  19. Multi-agent system - Wikipedia, dernier accès : août 13, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent_system)
  20. A Survey of Environments and Mechanisms for ... - ABC Research, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.abcresearch.org/abc/papers/E4MAS05HHS.pdf>
  21. The Triadic Evolution — Part 7— The Art of Coordination ... - Medium, dernier accès : août 13, 2025, <https://medium.com/@milchman/the-triadic-evolution-part-7-the-art-of-coordination-coordination-within-and-across-units-8453e22e3656>
  22. Multi Agent Systems: A Comprehensive Guide to Scaling AI Agents for Business, dernier accès : août 13, 2025, <https://kamexa.ai/multi-agent-systems-business-adoption-2/>
  23. Jacques Ferber: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.jasss.org/4/2/reviews/rouchier.html>
  24. Multi-Agent Coordination across Diverse Applications: A Survey - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/html/2502.14743v2>
  25. [2502.14743] Multi-Agent Coordination across Diverse Applications: A Survey - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/abs/2502.14743>
  26. How Game Theory Shapes Modern Multi-Agent AI Systems | by Tiyasa Mukherjee - Medium, dernier accès : août 13, 2025, <https://medium.com/@mukherjeetiyasa1998/game-theoretic-impact-on-multi-agent-systems-4307c3e8872f>
  27. Multi-agent system: Types, working, applications and benefits - LeewayHertz, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.leewayhertz.com/multi-agent-system/>
  28. [Literature Review] Multi-Agent Coordination across Diverse Applications: A Survey, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.themoonlight.io/en/review/multi-agent-coordination-across-diverse-applications-a-survey>
  29. Topologies of agents interactions in knowledge intensive multi ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://digitalcommons.unomaha.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=compscifacpub>
  30. Decentralized Multi-agent Coordination under MITL Specifications and Communication Constraints - DiVA portal, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1701199/FULLTEXT01.pdf>
  31. Multi-Agent Systems: Technical & Ethical Challenges of Functioning in a Mixed Group, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.amacad.org/publication/daedalus/multi-agent-systems-technical-ethical-challenges-functioning-mixed-group>

32. Advancing Multi-Agent Systems Through Model Context Protocol: Architecture, Implementation, and Applications - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2504.21030>
33. Learning in Multiagent Systems: An Introduction from ... - Jose M. Vidal, dernier accès : août 13, 2025, <https://jmvidal.cse.sc.edu/papers/vidal03a.pdf>
34. Introduction to CAS - Complex Adaptive Systems - Western University, dernier accès : août 13, 2025, <https://cas.uwo.ca/discover/cas-introduction.html>
35. Resilient control systems: A multi-agent dynamic systems perspective, dernier accès : août 13, 2025, <https://inl.elsevierpure.com/en/publications/resilient-control-systems-a-multi-agent-dynamic-systems-perspecti>
36. Organization of Multi-Agent Systems: An Overview - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/278282039\\_Organization\\_of\\_Multi-Agent\\_Systems\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/278282039_Organization_of_Multi-Agent_Systems_An_Overview)
37. What is a Data Mesh? A Quick FAQ About the New Mesh on the Block - Solace, dernier accès : août 13, 2025, <https://solace.com/blog/what-is-data-mesh-architecture-faq/>
38. Agentic Mesh: Principles for an Autonomous Agent Ecosystem Marketing - Global AI Marketing Agency, dernier accès : août 13, 2025, <https://matrixmarketinggroup.com/agentic-mesh-principles-autonomous-agent-ecosystem-marketing/>
39. Multi-agent Dynamic Interaction in Simulation of Complex Adaptive Systems - ThinkMind, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.thinkmind.org/articles/simul\\_2024\\_1\\_60\\_50036.pdf](https://www.thinkmind.org/articles/simul_2024_1_60_50036.pdf)
40. (PDF) Adaptive agents and multiagent systems - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/3453143\\_Adaptive\\_agents\\_and\\_multiagent\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/3453143_Adaptive_agents_and_multiagent_systems)
41. Open-loop Stackelberg learning solution for hierarchical control problems, dernier accès : août 13, 2025, <https://ncr.mae.ufl.edu/papers/ijacsp19.pdf>
42. Stackelberg Actor-Critic: Game-Theoretic Reinforcement Learning ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10323173>
43. Stackelberg Meta-Learning Based Control for Guided Cooperative LQG Systems, dernier accès : août 13, 2025, <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10487369>
44. Optimizing Automated Negotiation: Integrating Opponent Modeling ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://www.mdpi.com/2227-7390/13/4/679>
45. (PDF) Optimizing Automated Negotiation: Integrating Opponent Modeling with Reinforcement Learning for Strategy Enhancement - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/389162683\\_Optimizing\\_Automated\\_Negotiation\\_Integrating\\_Opponent\\_Modeling\\_with\\_Reinforcement\\_Learning\\_for\\_Strategy\\_Enhancement](https://www.researchgate.net/publication/389162683_Optimizing_Automated_Negotiation_Integrating_Opponent_Modeling_with_Reinforcement_Learning_for_Strategy_Enhancement)
46. (PDF) Consensus in Multi-Agent Systems - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/310588656\\_Consensus\\_in\\_Multi-Agent\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/310588656_Consensus_in_Multi-Agent_Systems)
47. Organization of Multi-Agent Systems: An Overview - Science Publishing Group, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ijis.20150403.11>
48. (PDF) Multi-Agent System Development Based on Organizations - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/222428629\\_Multi-Agent\\_System\\_Development\\_Based\\_on\\_Organizations](https://www.researchgate.net/publication/222428629_Multi-Agent_System_Development_Based_on_Organizations)
49. Four Design Patterns for Event-Driven, Multi-Agent Systems - Confluent, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.confluent.io/blog/event-driven-multi-agent-systems/>
50. An Architecture For Multi-Agent Systems Operating In ... - UWSpace, dernier accès : août 13, 2025, <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstreams/5464a5af-6678-437d-95e8-f90f44f4a5b2/download>
51. (PDF) Improving observability in Event Sourcing systems, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/352267210\\_Improving\\_observability\\_in\\_Event\\_Sourcing\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/352267210_Improving_observability_in_Event_Sourcing_systems)

52. Global-Scale Data Management with Strong Consistency Guarantees - eScholarship, dernier accès : août 13, 2025, <https://escholarship.org/uc/item/6583383c>
53. A PROGRAMMING FRAMEWORK TO EASE DEVELOPMENT OF TIGHTLY-COUPLED CLOUD APPLICATIONS - Purdue e-Pubs, dernier accès : août 13, 2025, [https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2560&context=open\\_access\\_dissertations](https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2560&context=open_access_dissertations)
54. Monitoring Data Usage in Distributed Systems - Ethz, dernier accès : août 13, 2025, <https://people.inf.ethz.ch/basin/pubs/TSE2013.pdf>
55. (PDF) Ensuring Temporal Consistency in Live Front-End Architectures - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/394063364\\_Ensuring\\_Temporal\\_Consistency\\_in\\_Live\\_Front-End\\_Architectures](https://www.researchgate.net/publication/394063364_Ensuring_Temporal_Consistency_in_Live_Front-End_Architectures)
56. A SCALABLE PARTIAL-ORDER DATA STRUCTURE FOR DISTRIBUTED-SYSTEM OBSERVATION - UWSpace - University of Waterloo, dernier accès : août 13, 2025, <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstreams/6fa6f4d5-5075-4f64-a7ed-f1fea09e590c/download>
57. Improving Visibility of Distributed Systems through Execution Tracing - UC Berkeley EECS, dernier accès : août 13, 2025, <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-167.pdf>
58. A Comprehensive Survey on Multi-Agent Cooperative Decision-Making: Scenarios, Approaches, Challenges and Perspectives - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/html/2503.13415v1>
59. Mechanism Design for Resource Allocation – with ... - IFAAMAS, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.ifaamas.org/Proceedings/aamas2015/aamas/p1741.pdf>
60. (PDF) Multiagent resource allocation - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/220254306\\_Multiagent\\_resource\\_allocation](https://www.researchgate.net/publication/220254306_Multiagent_resource_allocation)
61. Modelling Bounded Rationality in Multi-Agent Interactions by Generalized Recursive Reasoning - IJCAI, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.ijcai.org/proceedings/2020/0058.pdf>
62. (PDF) Game Theory and Multi-agent Reinforcement Learning - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/269100101\\_Game\\_Theory\\_and\\_Multi-agent\\_Reinforcement\\_Learning](https://www.researchgate.net/publication/269100101_Game_Theory_and_Multi-agent_Reinforcement_Learning)
63. Modelling Bounded Rationality in Multi-Agent Interactions by Generalized Recursive Reasoning | Request PDF - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/342796149\\_Modelling\\_Bounded\\_Rationality\\_in\\_Multi-Agent\\_Interactions\\_by\\_Generalized\\_Recursive\\_Reasoning](https://www.researchgate.net/publication/342796149_Modelling_Bounded_Rationality_in_Multi-Agent_Interactions_by_Generalized_Recursive_Reasoning)
64. Limitations of the Vickrey Auction in Computational Multiagent Systems - AAAI, dernier accès : août 13, 2025, <https://cdn.aaai.org/ICMAS/1996/ICMAS96-038.pdf>
65. Issues in Computational Vickrey Auctions\* - CMU School of ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://www.cs.cmu.edu/~sandholm/vickrey.IJEC.pdf>
66. Adaptive bidding in combinatorial auctions in dynamic markets - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/241052203\\_Adaptive\\_bidding\\_in\\_combinatorial\\_auctions\\_in\\_dynamic\\_markets](https://www.researchgate.net/publication/241052203_Adaptive_bidding_in_combinatorial_auctions_in_dynamic_markets)
67. Combinatorial Auctions in Practice - LSE Research Online, dernier accès : août 13, 2025, [http://eprints.lse.ac.uk/124108/1/Combinatorial\\_Auctions\\_in\\_Practice.pdf](http://eprints.lse.ac.uk/124108/1/Combinatorial_Auctions_in_Practice.pdf)
68. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, dernier accès : août 13, 2025, [http://www.eecs.ucf.edu/~lboloni/Teaching/EEL6788\\_2008/papers/The\\_Contract\\_Net\\_Protocol\\_Dec-1980.pdf](http://www.eecs.ucf.edu/~lboloni/Teaching/EEL6788_2008/papers/The_Contract_Net_Protocol_Dec-1980.pdf)
69. Modification of Contract Net Protocol (CNP) : A Rule-Updation Approach, dernier accès : août 13, 2025, <https://thesai.org/Publications/ViewPaper?Volume=4&Issue=11&Code=IJACSA&SerialNo=6>

70. Interest-based Negotiation in Multi-Agent Systems - MIT, dernier accès : août 13, 2025, <https://web.mit.edu/~irahwan/www/docs/thesis.pdf>
71. A systematic review of argumentation techniques for multi-agent systems research, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/282546561\\_A\\_systematic\\_review\\_of\\_argumentation\\_techniques\\_for\\_multi-agent\\_systems\\_research](https://www.researchgate.net/publication/282546561_A_systematic_review_of_argumentation_techniques_for_multi-agent_systems_research)
72. A survey on consensus algorithms for distributed wireless networks - SPIE Digital Library, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13513/3045449/A-survey-on-consensus-algorithms-for-distributed-wireless-networks/10.1117/12.3045449.full>
73. Distributed Optimal Control and Application to Consensus of Multi-Agent Systems - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2309.12577>
74. Survey of Distributed Algorithms for Resource Allocation over Multi-Agent Systems - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2401.15607>
75. Forming Stable, Overlapping Coalitions in an Open Multi-agent ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://aaai.org/papers/0023-fs07-06-023-forming-stable-overlapping-coalitions-in-an-open-multi-agent-system/>
76. Coordination in Multiagent Reinforcement Learning: A Bayesian Approach - Department of Computer Science, University of Toronto, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.cs.toronto.edu/~cebyl/Papers/download/bayesMARL.pdf>
77. Autonomous Infrastructure and Trustworthy AI: The Next Revolution in Platform Engineering, dernier accès : août 13, 2025, <https://platformengineering.com/platform-engineering/autonomous-infrastructure-and-trustworthy-ai-the-next-revolution-in-platform-engineering/>
78. The Agentic Transformation of Software Engineering | by Daniel Bentes | Jul, 2025 | Medium, dernier accès : août 13, 2025, <https://medium.com/@danielbentes/the-agentic-transformation-of-software-engineering-81d1d5dbd51e>
79. Manual QA + Automation + Ai + Internship + Career Program - Tech Start Academy, dernier accès : août 13, 2025, <https://techstartacademy.io/courses/manual-qa-automation-apprenticeship-career-program/>
80. Enterprise AI Upskilling Part 7: Comprehensive AI Practitioner Track — Cross-Functional Knowledge and Toolkits to Plan, Build, Deploy, and Sustain High-Value AI Solutions | by Adnan Masood, PhD. | Jul, 2025 | Medium, dernier accès : août 13, 2025, <https://medium.com/@adnanmasood/enterprise-ai-upskilling-part-7-comprehensive-ai-practitioner-track-cross-functional-knowledge-d23ca55be4e2>
81. A Survey on AgentOps: Categorization, Challenges, and Future Directions - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/html/2508.02121v1>
82. Toward standardization of GenAI-driven agentic architectures for radio access networks - PMC - PubMed Central, dernier accès : août 13, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12321753/>
83. Risk Analysis Techniques for Governed LLM-based Multi-Agent Systems - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/html/2508.05687v1>
84. AI Agent Evaluation: Key Steps and Methods | Fiddler AI Blog, dernier accès : août 13, 2025, <https://www.fiddler.ai/blog/ai-agent-evaluation>
85. 7 Agent-to-Agent Interaction Frameworks That Make Multi-Agent AI Actually Work, dernier accès : août 13, 2025, <https://galileo.ai/blog/agent-to-agent-interaction-frameworks>
86. Why Do Multi-Agent LLM Systems Fail? - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2503.13657>
87. New whitepaper outlines the taxonomy of failure modes in AI agents ..., dernier accès : août 13, 2025, <https://www.microsoft.com/en-us/security/blog/2025/04/24/new-whitepaper-outlines-the-taxonomy-of-failure-modes-in-ai-agents/>
88. Multiparty Dynamics and Failure Modes for Machine Learning and Artificial Intelligence, dernier accès :



- août 13, 2025, <https://www.mdpi.com/2504-2289/3/2/21>
89. The Future of AI Agent Testing: Trends to Watch in 2025 | QAwerk, dernier accès : août 13, 2025, <https://qawerk.com/blog/ai-agent-testing-trends/>
90. Security in Agentic and Multiagent Systems – A Critical Need for the Future - PubsOnLine, dernier accès : août 13, 2025, <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/LYTX.2025.02.01/full/>
91. Benchmarking Multi-Agent AI: Insights & Practical Use | Galileo, dernier accès : août 13, 2025, <https://galileo.ai/blog/benchmarks-multi-agent-ai>
92. Adaptivity and Antifragility | Request PDF - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/371269808\\_Adaptivity\\_and\\_Antifragility](https://www.researchgate.net/publication/371269808_Adaptivity_and_Antifragility)
93. (PDF) The Fundamentals of Complex Adaptive Systems - ResearchGate, dernier accès : août 13, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/333780588\\_The\\_Fundamentals\\_of\\_Complex\\_Adaptive\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/333780588_The_Fundamentals_of_Complex_Adaptive_Systems)
94. Antifragility - Wikipedia, dernier accès : août 13, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Antifragility>
95. From Resilience to the Design of Antifragility - ThinkMind, dernier accès : août 13, 2025, [http://www.thinkmind.org/articles/pesaro\\_2018\\_2\\_10\\_60003.pdf](http://www.thinkmind.org/articles/pesaro_2018_2_10_60003.pdf)
96. What Are Multiagent Systems? The Future of AI in 2025, dernier accès : août 13, 2025, <https://inclusioncloud.com/insights/blog/multiagent-systems-guide/>
97. The Future of Multi-Agent Systems: Trends, Challenges, and Opportunities - SmythOS, dernier accès : août 13, 2025, <https://smythos.com/developers/agent-development/future-of-multi-agent-systems/>
98. A Survey on Context-Aware Multi-Agent Systems: Techniques, Challenges and Future Directions - arXiv, dernier accès : août 13, 2025, <https://arxiv.org/html/2402.01968v1>