

Essais

Titre : Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative

Sous-titre : Vers une Théorie de l'Entreprise Agentique

Auteur : [Nom de l'Auteur]

Université : [Nom de l'Université]

Département :

Date : [Mois, Année]

Résumé

La transformation numérique, l'avènement de l'intelligence artificielle (IA) et l'émergence de structures organisationnelles décentralisées ont engendré un environnement d'affaires caractérisé par une volatilité, une incertitude, une complexité et une ambiguïté (VUCA) sans précédent. Dans ce contexte, les cadriciels d'architecture d'entreprise (AE) traditionnels, tels que Zachman et TOGAF, conçus pour des environnements stables et hiérarchiques, révèlent leurs limites conceptuelles et pratiques. Leur paradigme, fondamentalement mécaniste et prescriptif, s'avère inadéquat pour modéliser, guider et faire évoluer l'entreprise moderne, que nous conceptualisons comme une « Entreprise Agentique » : un système complexe adaptatif composé d'agents autonomes, humains et artificiels, en interaction constante.

Cette thèse aborde cette problématique en posant la question de recherche suivante : Quels sont les principes fondateurs, les composants méta-modèles et les mécanismes dynamiques d'un cadriciel d'architecture d'entreprise capable de soutenir une organisation conçue comme un système d'interopérabilité cognitivo-adaptatif? Pour y répondre, nous adoptons une méthodologie de recherche en science de la conception (Design Science Research), dont l'objectif est la création d'un artefact innovant.

L'artefact proposé est le **Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA)**. Ce cadriciel est construit sur la synthèse de

plusieurs corpus théoriques. Premièrement, il intègre les principes des systèmes complexes adaptatifs (CAS) pour gérer l'émergence, l'incertitude et la co-évolution entre l'organisation et son environnement. Deuxièmement, il s'appuie sur la théorie des systèmes multi-agents (SMA) pour définir un méta-modèle organisationnel fondé sur les concepts d'Agent, de Groupe et de Rôle, permettant une allocation dynamique des capacités et une gouvernance décentralisée. Troisièmement, il structure la collaboration agentique à travers un modèle d'interopérabilité multi-niveaux (technique, sémantique et organisationnelle), où les ontologies partagées jouent un rôle central pour assurer une compréhension commune. Enfin, il dote l'architecture d'une dimension cognitive, modélisant la mémoire, l'apprentissage et le raisonnement comme des capacités organisationnelles distribuées.

Les principaux résultats de cette recherche sont la formalisation du cadriciel CAIA-EA, la définition de son méta-modèle, de ses principes directeurs et de ses couches d'interopérabilité. La pertinence et l'utilité du cadriciel sont démontrées par son application à deux cas d'étude théoriques : la conception d'une chaîne logistique intelligente et résiliente, capable d'anticiper et de s'adapter aux perturbations, et la structuration de la gouvernance des organisations autonomes décentralisées (DAO).

La contribution originale de ce travail réside dans la proposition d'un nouveau paradigme pour l'architecture d'entreprise, qui déplace le focus de la planification statique et du contrôle centralisé vers la facilitation de l'adaptation dynamique et de la gouvernance émergente. Le cadriciel CAIA-EA offre ainsi un fondement théorique et pratique pour penser et construire les organisations de l'ère de l'intelligence artificielle.

Mots-clés : Architecture d'Entreprise, Systèmes Complexes Adaptatifs, Systèmes Multi-Agents, Interopérabilité, Systèmes Cognitifs, Gouvernance Décentralisée, Design Science Research.

Table des Matières

(Générée automatiquement)

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Synthèse Critique des Cadriciels d'AE Traditionnels

Tableau 6.1 : Application du Cadriciel CAIA-EA aux Défis de la Chaîne Logistique

Liste des Figures

(Générée automatiquement)

Liste des Acronymes

ABM : Agent-Based Modeling (Modélisation Basée sur les Agents)
ACL : Agent Communication Language
ADM : Architecture Development Method
AE : Architecture d'Entreprise
AI : Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)
AOEA : Agent-Oriented Enterprise Architecture
CAIA-EA : Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative
CAS : Complex Adaptive Systems (Systèmes Complexes Adaptatifs)
DAO : Decentralized Autonomous Organization (Organisation Autonome Décentralisée)
DSR : Design Science Research
EA : Enterprise Architecture
FIPA : Foundation for Intelligent Physical Agents
IA : Intelligence Artificielle
MAS : Multi-Agent System (Système Multi-Agents)
SMA : Système Multi-Agents
TOGAF : The Open Group Architecture Framework
VUCA : Volatility, Uncertainty, Complexity, and Ambiguity

Introduction

1.1 Contexte : La Crise des Paradigmes d'Architecture d'Entreprise

Le paysage économique et technologique contemporain est le théâtre d'une transformation profonde, caractérisée par une accélération sans précédent du changement. Les organisations évoluent désormais dans un environnement que l'on qualifie de VUCA (Volatilité, Incertitude, Complexité et Ambiguïté), où les modèles d'affaires établis sont constamment remis en question par des innovations de rupture. Cette dynamique est principalement alimentée par la convergence de plusieurs forces majeures : la transformation numérique généralisée, la maturité des technologies d'intelligence artificielle (IA) et l'émergence de nouveaux modèles organisationnels fondés sur la décentralisation.¹

Historiquement, les organisations prospéraient grâce à la stabilité, à la planification à long terme et à des structures hiérarchiques claires. L'architecture d'entreprise (AE), en tant que discipline, est née de ce besoin de maîtrise et de rationalisation. Son objectif était de créer une représentation cohérente des processus métier, des systèmes d'information et de l'infrastructure technologique afin d'assurer l'alignement stratégique, de standardiser les pratiques et de contrôler les coûts. L'AE était perçue comme un outil de planification et de contrôle, un moyen de dessiner le plan directeur d'une organisation conçue comme une machine complexe mais prévisible.

Cependant, ce paradigme mécaniste est aujourd'hui en crise. La survie et la compétitivité ne dépendent plus de la capacité à exécuter un plan rigide, mais de l'aptitude à s'adapter en continu aux fluctuations de l'environnement.³ L'organisation n'est plus une machine, mais s'apparente davantage à un écosystème vivant, un réseau dynamique d'acteurs en interaction constante. Dans ce contexte, l'architecture d'entreprise doit radicalement changer de vocation. D'un instrument de contrôle et de standardisation, elle doit se muer en un catalyseur d'agilité, de résilience et d'adaptation.⁴ Elle ne doit plus seulement décrire la structure de l'entreprise, mais doit également faciliter son évolution permanente.

1.2 Problématique : L'Inadéquation des Cadriciels Héréditaires face à l'Entreprise Agentique

Le cœur de notre problématique réside dans le constat d'une rupture épistémologique entre les fondements des cadriciels d'AE traditionnels et la nature des organisations modernes. Les cadres de référence les plus influents, notamment le Zachman Framework et The Open Group Architecture Framework (TOGAF), ont été conçus pour une ère révolue. Ils reposent sur une vision du monde où l'entreprise peut être entièrement décrite, analysée et optimisée de manière déterministe et descendante. Or, cette vision est fondamentalement incompatible avec la réalité d'une organisation moderne, que nous proposons de nommer l'**Entreprise Agentique**.

Une Entreprise Agentique est une organisation conceptualisée comme un système complexe adaptatif (Complex Adaptive System - CAS), composé d'une multitude d'agents autonomes (employés, équipes, partenaires, mais aussi systèmes d'IA, objets connectés) qui interagissent, prennent des décisions locales et dont le comportement collectif fait émerger la stratégie et la performance globales.⁶ Dans une telle entreprise, l'ordre n'est pas entièrement imposé par le haut ; il émerge de la coordination et de la collaboration décentralisées.

Face à ce nouveau paradigme, les cadriciels hérités révèlent des faiblesses structurelles profondes :

- **La Rigidité Ontologique de Zachman** : Le cadriciel de Zachman, par sa nature de taxonomie statique, propose une grille de classification (une matrice 6x6) pour les artefacts architecturaux.⁹ Bien qu'utile pour assurer la complétude descriptive, cette structure est fondamentalement inapte à représenter les processus dynamiques, les boucles de rétroaction et les comportements émergents qui caractérisent un système adaptatif.⁷ Sa critique la plus fondamentale concerne sa colonne « Qui » (Who), qui réduit les acteurs à une simple catégorie parmi d'autres, sans pouvoir modéliser leur autonomie, leurs capacités cognitives ou leurs interactions complexes, en particulier dans le contexte de la collaboration homme-machine et de l'IA.⁷ Cette approche est issue d'une analogie jugée erronée avec l'ingénierie des produits manufacturés et a été critiquée pour son manque d'utilité pratique et son potentiel à générer une documentation excessive et stérile.⁸
- **La Fragilité Procédurale de TOGAF** : TOGAF, centré sur sa méthode de développement de l'architecture (Architecture Development Method - ADM),

propose un processus cyclique et prescriptif pour concevoir et gouverner l'AE.⁷ Si cette approche apporte une structure rassurante, elle est souvent perçue comme trop lourde, lente et bureaucratique pour les environnements agiles.⁹ Elle encourage une planification initiale extensive (« up-front planning ») qui entre en conflit avec les principes de développement itératif et d'évolution incrémentale. De plus, TOGAF offre des orientations limitées sur les aspects humains et organisationnels de la transformation, se concentrant davantage sur la production d'artefacts techniques que sur la facilitation du changement culturel et comportemental.⁴ En pratique, de nombreuses organisations n'utilisent TOGAF que de manière « purement déclarative », ignorant ses prescriptions jugées trop contraignantes.⁸

- **Un Angle Mort Commun :** Au-delà de leurs faiblesses spécifiques, ces cadres partagent un angle mort fondamental. Ils ne possèdent pas de concepts natifs pour modéliser les fonctions cognitives (apprentissage, raisonnement), la gouvernance décentralisée, ou les multiples niveaux d'interopérabilité (en particulier sémantique et organisationnelle) qui sont pourtant essentiels au fonctionnement d'une Entreprise Agentique. Ils décrivent la structure, mais ignorent largement l'intelligence et la capacité d'adaptation qui animent cette structure.

La problématique de cette recherche est donc claire : il existe un vide théorique et méthodologique. Aucun cadre d'architecture d'entreprise existant n'est conceptuellement équipé pour modéliser, gouverner ou faire évoluer une organisation conçue comme un système d'interopérabilité cognitivo-adaptatif composé d'agents autonomes.

1.3 Questions de Recherche et Hypothèses

Pour adresser cette problématique, notre investigation est guidée par une question de recherche principale, déclinée en plusieurs sous-questions.

Question de Recherche Principale :

Quels sont les principes fondateurs, les composants méta-modèles et les mécanismes dynamiques d'un cadre d'architecture d'entreprise capable de modéliser et de guider une organisation conçue comme un système d'interopérabilité cognitivo-adaptatif composé d'agents autonomes (une Entreprise Agentique)?

Questions de Recherche Secondaires :

1. Comment un tel cadriciel peut-il intégrer les principes des systèmes complexes adaptatifs (CAS) pour gérer l'émergence, l'incertitude et la co-évolution organisationnelle?
2. Quelle structure méta-modèle peut représenter adéquatement les agents (humains et IA), leurs capacités cognitives, leurs rôles dynamiques et leurs interactions collectives au sein de l'entreprise?
3. Comment le cadriciel peut-il assurer une interopérabilité multi-niveaux (technique, sémantique, organisationnelle) pour permettre une collaboration effective et une gouvernance décentralisée entre les agents?

Ces questions nous amènent à formuler une hypothèse centrale qui structure l'ensemble de notre démarche.

Hypothèse Centrale :

Il est possible de construire un Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA) en réalisant une synthèse rigoureuse de théories issues des systèmes complexes, des systèmes multi-agents et de l'ingénierie des ontologies. Un tel cadriciel offrira une capacité descriptive et prescriptive supérieure aux approches traditionnelles pour appréhender et piloter les organisations de l'ère numérique et de l'intelligence artificielle.

1.4 Objectifs et Contribution Originale

Sur la base de cette problématique et de ces questions, nous définissons les objectifs de cette thèse.

Objectif Général :

Concevoir, formaliser et justifier le Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA).

Objectifs Spécifiques :

1. Réaliser une analyse critique approfondie des fondements et des limites des cadriciels d'architecture d'entreprise existants afin d'établir la nécessité d'un nouveau paradigme.
2. Élaborer un méta-modèle conceptuel pour l'Entreprise Agentique, capable de représenter ses composants fondamentaux (agents, rôles, collectifs) et leurs attributs cognitifs.
3. Définir les couches d'interopérabilité (technique, sémantique, organisationnelle)

du cadriciel et spécifier les mécanismes qui les animent.

4. Démontrer la pertinence et l'utilité potentielle du cadriciel CAIA-EA par l'analyse de son application à des cas d'usage théoriques complexes, tels que la gestion de chaînes logistiques résilientes et la gouvernance d'organisations autonomes décentralisées.

La **contribution originale** de cette recherche est double. Sur le plan théorique, elle propose un nouveau paradigme pour l'architecture d'entreprise, en la fondant sur les sciences de la complexité et de l'intelligence artificielle. Elle offre un langage et un modèle pour penser l'organisation non plus comme une structure statique à optimiser, mais comme un système vivant et intelligent à cultiver. Sur le plan pratique, le cadriciel CAIA-EA vise à fournir aux architectes d'entreprise, aux DSI (Directeurs des Systèmes d'Information) et aux dirigeants un outil conceptuel pour naviguer la complexité, concevoir des organisations plus agiles et résilientes, et intégrer de manière synergique les intelligences humaine et artificielle. En somme, cette thèse ambitionne de jeter les bases d'une architecture d'entreprise pour le 21^e siècle.

Chapitre 1 : Revue de Littérature – Fondements et Limites des Architectures d'Entreprise

Ce chapitre a pour objectif de construire le socle théorique de notre recherche. Il procède en quatre temps. D'abord, il analyse de manière critique les piliers classiques de l'architecture d'entreprise, Zachman et TOGAF, pour en exposer les limites fondamentales. Ensuite, il établit l'impératif d'une interopérabilité multi-niveaux, condition sine qua non de la collaboration dans les systèmes distribués. Puis, il explore les fondements des systèmes cognitivo-adaptatifs, en s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes et l'intelligence artificielle. Enfin, il introduit la théorie des systèmes multi-agents comme paradigme pour conceptualiser l'Entreprise Agentique. La synthèse de ces analyses permettra d'identifier précisément la lacune scientifique que notre cadriciel se propose de combler.

1.1 Les Piliers Classiques : L'Ontologie de Zachman et le Processus de TOGAF

L'histoire de l'architecture d'entreprise est dominée par deux cadres de référence qui, bien que complémentaires, incarnent des philosophies distinctes : le Zachman Framework, qui propose une ontologie pour la description de l'entreprise, et TOGAF, qui offre un processus pour le développement de son architecture.

1.1.1 Le Zachman Framework : une Taxonomie Statique

Développé par John Zachman chez IBM en 1987, le Zachman Framework est le pionnier de la discipline.⁷ Il ne s'agit pas d'une méthodologie, mais d'une taxonomie ou d'une ontologie, conçue comme un schéma de classification pour les artefacts descriptifs d'une entreprise.⁷ Sa structure est une matrice à deux dimensions, généralement 6x6, qui croise six interrogations fondamentales (Quoi/Données, Comment/Fonction, Où/Réseau, Qui/Personnes, Quand/Temps, Pourquoi/Motivation) avec six perspectives ou niveaux d'abstraction (Planificateur, Propriétaire, Concepteur, Constructeur, Sous-traitant, et l'entreprise en fonctionnement).⁹ L'intersection de chaque ligne et colonne définit une cellule qui représente un modèle ou un artefact spécifique (par exemple, la cellule "Données" x "Propriétaire" correspond au modèle sémantique de l'entreprise).

La force du cadrage de Zachman réside dans sa capacité à offrir une vue d'ensemble structurée et à garantir une certaine complétude dans la description de l'entreprise. Il agit comme une "checklist" intellectuelle, forçant les architectes à considérer tous les aspects de l'entreprise depuis de multiples points de vue.¹⁴

1.1.2 TOGAF : un Processus Prescriptif

Développé par The Open Group, TOGAF est aujourd'hui le standard de facto de l'industrie pour la pratique de l'AE.¹¹ Contrairement à Zachman, TOGAF est à dominance méthodologique. Son cœur est l'

Architecture Development Method (ADM), un processus itératif et cyclique qui guide les architectes à travers les différentes phases de développement, de mise en

œuvre et de gouvernance de l'architecture.⁷ L'ADM est complété par un ensemble de lignes directrices, de techniques, un méta-modèle de contenu (Content Metamodel) qui définit les livrables, et un "Continuum d'Entreprise" pour classer les actifs architecturaux.⁷ TOGAF couvre quatre domaines d'architecture principaux : Métier (Business), Données (Data), Applications, et Technologie.

La popularité de TOGAF s'explique par son approche systématique et détaillée, qui fournit une feuille de route claire pour les équipes d'architecture. Il vise à aligner les investissements informatiques avec les objectifs métier et à gérer le cycle de vie de l'architecture de manière contrôlée.¹³

1.1.3 Analyse Critique et Limites Fondamentales

Malgré leur influence, ces deux cadres font l'objet de critiques de plus en plus vives, car leurs fondements paradigmatiques ne correspondent plus à la nature des organisations contemporaines.

La critique du **Zachman Framework** est particulièrement sévère. Son approche taxonomique est jugée trop rigide et statique. Elle se prête mal à la représentation des dynamiques et des interactions d'un système complexe.⁷ Fondé sur une analogie avec l'ingénierie et la construction de produits physiques, le cadre peine à capturer la nature sociale, évolutive et souvent imprévisible d'une organisation.⁸ Les tentatives de l'appliquer de manière exhaustive ont parfois conduit à des échecs coûteux, noyant les équipes dans une production de modèles "à un niveau de détail atroce" que personne ne peut maintenir à jour.⁸ Plus spécifiquement, le cadre est mal équipé pour l'ère de l'IA : la colonne "Qui" est réductrice et ne permet pas de modéliser l'autonomie, l'intelligence et les interactions complexes des agents humains et artificiels. Des dimensions modernes comme l'approche par capacités ou l'expérience client y sont absentes.⁷

TOGAF, quant à lui, est souvent critiqué pour sa lourdeur et sa complexité. Son processus ADM, hérité des méthodes en cascade ("waterfall"), est perçu comme trop prescriptif, lent et gourmand en documentation, ce qui le rend inadapté aux cycles de développement agiles et à la nécessité d'une adaptation rapide.⁴ Des praticiens expérimentés le jugent "démodé" et restrictif, notant son manque de directives sur des sujets cruciaux comme la gestion du changement organisationnel et la transformation métier – les aspects "humains" de la transformation.¹⁴ En

conséquence, TOGAF est souvent utilisé de manière superficielle, comme un simple label, tandis que des approches plus pragmatiques sont suivies en pratique.⁸

Le tableau suivant synthétise cette analyse critique, mettant en évidence l'inadéquation de ces cadrage face aux impératifs d'adaptativité et d'agentivité.

Tableau 1.1 : Synthèse Critique des Cadrage d'AE Traditionnels

Cadrage	Paradigme Fondamental	Forces Reconnues	Limites - Adaptativité	Limites - Agentivité	Sources Clés
Zachman Framework	Ontologie / Taxonomie Statique	Complétude de la description, structure logique pour classer les artefacts.	Très faible. Structure rigide et statique, inapte à modéliser les processus dynamiques et l'évolution. Basé sur une analogie erronée avec l'ingénierie physique.	Très faible. La colonne "Qui" est réductrice, incapable de représenter l'autonomie, la cognition et les interactions complexes des agents (humains et IA).	7
TOGAF	Processus / Méthodologie Prescriptive	Approche systématique et détaillée du cycle de vie de l'architecture, standard de l'industrie.	Faible. Processus ADM perçu comme lourd, lent et bureaucratique. Inadapté aux approches agiles et à l'adaptation continue.	Faible. Se concentre sur les artefacts et le processus, avec peu de directives sur la gestion du changement organisationnel et les aspects humains ("people-centric").	4

Cette analyse démontre que les fondations mêmes de l'AE traditionnelle sont

ébranlées. Un nouveau paradigme est nécessaire, capable de dépasser la simple description statique et le processus rigide pour embrasser la dynamique, l'intelligence et la collaboration décentralisée.

1.2 L'Impératif d'Interopérabilité : Des Niveaux Techniques aux Niveaux Organisationnels

Au cœur de l'Entreprise Agentique se trouve la collaboration entre des entités autonomes. Cette collaboration ne peut exister sans interopérabilité, définie comme la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser mutuellement les informations qui ont été échangées.¹⁸ Loin d'être un concept monolithique, l'interopérabilité se décline en une hiérarchie de niveaux, chaque niveau s'appuyant sur le précédent pour permettre des formes de coopération de plus en plus sophistiquées. La littérature, notamment dans les domaines de la santé et des services publics européens, converge vers un modèle à plusieurs couches que nous synthétisons ici.¹⁹

- **Niveau 1 : Interopérabilité Technique (ou Fondamentale).** C'est le niveau le plus basique. Il concerne la capacité à établir une connexion et à échanger des données. Il s'agit des "tuyaux" de la communication, définis par des protocoles de transport (comme TCP/IP, HTTP) et des standards de connectivité.¹⁹ Ce niveau garantit que les bits et les octets peuvent être transmis d'un point A à un point B sans corruption, mais il ne dit rien sur la structure ou la signification de ces données.
- **Niveau 2 : Interopérabilité Structurale (ou Syntaxique).** Ce niveau va plus loin en définissant une structure et un format communs pour les données échangées. Il s'agit de la "grammaire" de la communication. En utilisant des formats standardisés comme XML ou JSON, et des structures de messages définies (par exemple, via les standards HL7 ou CDA dans le domaine de la santé), ce niveau assure que le système récepteur peut correctement parser et interpréter la structure du message reçu.¹⁹ Les données deviennent interprétables par une machine, mais leur signification profonde n'est pas encore garantie.
- **Niveau 3 : Interopérabilité Sémantique.** C'est le niveau le plus élevé et le plus crucial pour une collaboration intelligente. L'interopérabilité sémantique garantit que le *sens* des données échangées est compris de manière univoque par toutes les parties.¹⁹ Elle va au-delà de la syntaxe pour s'attaquer au contenu et au

contexte. Pour y parvenir, les systèmes doivent s'appuyer sur des vocabulaires contrôlés, des taxonomies et, surtout, des

ontologies partagées. Une ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée, qui définit les concepts d'un domaine et les relations entre eux.²⁵ Par exemple, grâce à des terminologies comme SNOMED CT, deux systèmes de santé peuvent être certains que le code "91936005" fait référence sans ambiguïté à une "allergie à la pénicilline".²⁰ C'est ce niveau qui permet à des agents intelligents de raisonner sur les informations échangées.

- **Niveau 4 : Interopérabilité Organisationnelle (et Légale).** Même si les systèmes peuvent communiquer techniquement et se comprendre sémantiquement, une collaboration efficace nécessite un alignement au niveau des processus et de la gouvernance. L'interopérabilité organisationnelle couvre les aspects non techniques tels que l'alignement des processus métier, la définition de politiques communes, l'établissement de cadres de confiance et la clarification des aspects légaux et contractuels.¹⁸ Ce niveau assure que les actions coordonnées des agents sont cohérentes avec les objectifs globaux de l'organisation ou de l'écosystème.

Cette hiérarchie est fondamentale. Une défaillance à un niveau supérieur (par exemple, un désaccord sur la signification d'un terme métier) ne peut être résolue en perfectionnant un niveau inférieur (par exemple, en changeant de protocole réseau). Un cadre d'architecture pour l'Entreprise Agentique doit donc impérativement structurer et adresser chacun de ces niveaux d'interopérabilité pour permettre une collaboration effective.

1.3 L'Émergence des Systèmes Cognitivo-Adaptatifs

Le deuxième pilier conceptuel de notre cadre est l'idée que l'entreprise est un système cognitivo-adaptatif. Ce concept est une fusion de deux domaines de recherche : la théorie des systèmes complexes adaptatifs et l'informatique cognitive, propulsée par l'intelligence artificielle.

1.3.1 L'Entreprise comme Système Complexe Adaptatif (CAS)

La théorie des systèmes complexes, issue de la physique et de la biologie, offre un cadre puissant pour comprendre les organisations qui opèrent dans des environnements incertains.²⁷ Un système complexe adaptatif (CAS) est un système composé d'un grand nombre d'agents autonomes qui interagissent de manière non-simple, et dont le comportement global est plus que la somme des parties.²⁷ Ces systèmes partagent plusieurs propriétés clés :

- **Émergence** : Des structures et des comportements macroscopiques (comme la culture d'entreprise ou les dynamiques de marché) émergent des interactions locales et non coordonnées des agents, sans être explicitement programmés ou dirigés par une autorité centrale.²⁷
- **Dynamiques Non-Linéaires** : De petits changements dans les conditions initiales ou les règles d'interaction peuvent avoir des effets disproportionnés et imprévisibles sur le système (l'effet papillon).²⁷
- **Boucles de Rétroaction (Feedback Loops)** : Les actions des agents modifient l'environnement, qui à son tour influence les actions futures des agents, créant des boucles de renforcement ou d'équilibrage.²⁷
- **Adaptation** : Les agents et le système dans son ensemble apprennent de l'expérience et modifient leurs comportements ou leurs structures pour mieux s'adapter à leur environnement.³⁰ L'entreprise, en tant que CAS, co-évolue avec son marché, ses concurrents et son contexte réglementaire.³

Cependant, une vision nuancée est nécessaire. Une focalisation excessive sur l'adaptativité peut être trompeuse. Des recherches récentes soulignent l'importance de la **stabilité** ou d'une certaine forme de "rigidité" pour la résilience des systèmes sociaux.³⁰ Les normes, les routines et l'identité organisationnelle agissent comme des ancrages qui permettent au système de maintenir sa cohérence face aux perturbations. Un système qui s'adapte trop et trop vite risque de perdre son identité et de se désintégrer. La véritable résilience réside dans un équilibre dynamique entre le changement adaptatif et la préservation de structures fondamentales.³⁰

1.3.2 Les Systèmes Cognitifs et le Moteur de l'IA

Si la théorie des CAS décrit la *dynamique* de l'entreprise, l'informatique cognitive décrit son *intelligence*. Un système cognitif est un système d'IA conçu pour simuler les

processus de la pensée humaine afin de résoudre des problèmes complexes et ambigus.³¹ Contrairement aux systèmes d'IA traditionnels conçus pour des tâches étroites, les systèmes cognitifs se caractérisent par :

- **L'Apprentissage Adaptatif** : Ils apprennent en continu de nouvelles informations et des interactions avec les utilisateurs et l'environnement, améliorant leurs performances au fil du temps.³¹
- **La Compréhension du Contexte** : Ils sont capables d'interpréter et de synthétiser des informations provenant de sources hétérogènes et non structurées (texte, image, données de capteurs) pour en saisir le sens et les nuances.³¹
- **L'Interaction Naturelle** : Ils peuvent interagir avec les humains en langage naturel, poser des questions pour clarifier les ambiguïtés et justifier leurs conclusions.³¹

L'intelligence artificielle, et en particulier l'apprentissage automatique (Machine Learning), est le moteur technologique qui rend ces capacités possibles. Les systèmes d'IA fonctionnent en combinant de vastes ensembles de données, des algorithmes sophistiqués et une puissance de calcul massive.³⁴ Par des processus d'entraînement, les modèles d'IA apprennent à reconnaître des motifs, à faire des prédictions et à prendre des décisions. Ils constituent le "cerveau" distribué de l'Entreprise Agentique, permettant d'analyser des volumes de données qui dépassent les capacités humaines et d'automatiser des décisions complexes.³⁵ Cependant, leur déploiement soulève d'importantes considérations éthiques, notamment en ce qui concerne les biais hérités des données d'entraînement et la confidentialité des données.³⁴

1.4 Vers l'Entreprise Agentique : Théories des Systèmes Multi-Agents (SMA)

Le concept d'Entreprise Agentique trouve son fondement le plus direct dans la théorie des Systèmes Multi-Agents (SMA), un sous-domaine de l'intelligence artificielle distribuée. Un SMA est un système informatisé composé de multiples agents intelligents en interaction, capable de résoudre des problèmes qui seraient difficiles ou impossibles à traiter pour un agent unique ou un système monolithique.³⁷

- **L'Agent comme Unité Fondamentale** : Un agent est une entité autonome qui

perçoit son environnement (via des capteurs ou des flux de données) et agit sur cet environnement (via des effecteurs ou des API) pour atteindre ses objectifs.³⁹

Les propriétés clés d'un agent sont l'

autonomie (il opère sans intervention directe), la **sociabilité** (il interagit avec d'autres agents), la **réactivité** (il répond aux changements de l'environnement) et la **proactivité** (il prend des initiatives pour atteindre ses buts).⁴⁰

- **L'Organisation comme Structure d'Interaction** : Les SMA s'inspirent des structures organisationnelles humaines pour coordonner le travail des agents.³⁹ Plutôt que de laisser les interactions au hasard, on définit des architectures pour structurer la collaboration. Celles-ci peuvent être **centralisées** (un agent coordinateur distribue les tâches), **hiérarchiques** (une structure de commandement) ou, de plus en plus, **décentralisées**, où les agents négocient et se coordonnent entre pairs.³⁸ L'approche décentralisée offre une plus grande robustesse et scalabilité, car elle ne dépend pas d'un point de défaillance unique.³⁸
- **Les Méta-Modèles Organisationnels** : Pour concevoir des SMA complexes et hétérogènes, des méta-modèles ont été proposés pour décrire la structure sociale du système. L'un des plus influents est le modèle **AALAADIN**, qui structure l'organisation autour de trois concepts fondamentaux :
 - **Agent** : L'entité active qui exécute les actions.
 - **Rôle** : Une spécification abstraite d'un comportement attendu au sein d'un certain contexte. Un rôle définit des droits, des devoirs et des protocoles d'interaction. Un même agent peut jouer plusieurs rôles.
 - **Groupe** : Un ensemble d'agents qui partagent un contexte et collaborent en jouant des rôles spécifiques pour atteindre un objectif commun.Ce modèle Agent-Groupe-Rôle (AGR) permet de dissocier l'identité de l'agent de sa fonction à un instant t, offrant une flexibilité et une modularité considérables pour la conception de systèmes adaptatifs.⁴³

Le paradigme des SMA fournit ainsi le langage et les concepts nécessaires pour modéliser l'Entreprise Agentique, non pas comme un organigramme statique, mais comme une société dynamique d'agents intelligents collaborant au sein de structures organisationnelles flexibles.

1.5 Synthèse et Identification des Lacunes

La revue de la littérature a mis en lumière quatre domaines clés. Premièrement, les cadres d'AE traditionnels comme Zachman et TOGAF sont fondés sur un paradigme mécaniste et prescriptif qui est en décalage avec la nature dynamique et complexe des organisations modernes. Deuxièmement, une collaboration efficace dans ces organisations distribuées exige une interopérabilité robuste à plusieurs niveaux, notamment sémantique et organisationnelle. Troisièmement, les théories des systèmes complexes adaptatifs et de l'informatique cognitive fournissent les concepts nécessaires pour comprendre l'entreprise comme un système intelligent et évolutif. Quatrièmement, la théorie des systèmes multi-agents offre un paradigme de modélisation puissant pour représenter l'entreprise comme une société d'agents autonomes.

La synthèse de ces constats révèle une lacune majeure dans la recherche. Bien que les briques théoriques existent de manière isolée, il n'existe à ce jour aucun cadre d'architecture d'entreprise qui les intègre de manière cohérente. Les critiques de l'AE traditionnelle appellent à plus d'agilité et d'adaptation, mais ne proposent pas de nouveau méta-modèle fondamental. Les modèles d'interopérabilité et les théories des SMA sont matures dans le domaine de l'informatique, mais n'ont pas été pleinement transposés et intégrés dans une méthodologie d'architecture à l'échelle de l'entreprise.

La lacune identifiée est donc l'absence d'un **cadre prescriptif et holistique** qui :

1. Adopte explicitement le paradigme de l'Entreprise Agentique comme un système cognitivo-adaptatif.
2. Fournit un méta-modèle pour décrire les agents, leurs capacités cognitives, leurs rôles et leurs structures de collaboration.
3. Structure l'architecture autour des différents niveaux d'interopérabilité comme principe organisateur.
4. Offre des directives pour concevoir et faire évoluer une organisation qui favorise l'émergence, la résilience et l'intelligence collective.

C'est précisément cette lacune que le Cadre d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA) que nous proposons dans cette thèse vise à combler.

Chapitre 2 : Méthodologie de Recherche – La Science de la Conception (Design Science Research)

Le choix d'une méthodologie de recherche appropriée est une étape fondamentale qui conditionne la rigueur, la validité et la portée des résultats d'une thèse. Compte tenu de notre objectif, qui est de créer un nouvel artefact conceptuel – le cadrice CAIA-EA – en réponse à une problématique pratique et théorique identifiée, notre choix s'est porté sur la **Science de la Conception (Design Science Research - DSR)**. Ce chapitre justifie ce choix en le positionnant par rapport aux autres paradigmes de recherche en systèmes d'information, décrit le processus de DSR que nous avons suivi, et précise les méthodes de collecte et d'analyse des données mobilisées.

2.1 Le Double Paradigme de la Recherche en Systèmes d'Information

La recherche dans la discipline des systèmes d'information (SI) est largement caractérisée par deux paradigmes fondamentaux qui poursuivent des objectifs distincts.⁴⁶

- Le **paradigme des sciences du comportement (behavioral science)** cherche à développer et à vérifier des théories qui *expliquent* ou *prédisent* des phénomènes liés au comportement humain ou organisationnel. Ancré dans la tradition des sciences naturelles et sociales, il vise à comprendre la réalité "telle qu'elle est". Les recherches menées dans ce cadre utilisent typiquement des méthodes quantitatives (enquêtes, expériences) ou qualitatives (études de cas, ethnographies) pour tester des hypothèses et construire des modèles explicatifs sur l'adoption des technologies, leur impact sur la performance, ou les interactions entre les individus, les organisations et la technologie.
- Le **paradigme de la science de la conception (design science)**, quant à lui, cherche à étendre les frontières des capacités humaines et organisationnelles en créant des artefacts nouveaux et innovants. Ancré dans l'ingénierie et les "sciences de l'artificiel" théorisées par Herbert Simon, il s'agit d'un paradigme fondamentalement orienté vers la résolution de problèmes.⁴⁶ Il ne vise pas seulement à décrire ou expliquer le monde, mais à le *changer* en concevant des solutions efficaces à des problèmes pertinents. L'objectif est de produire une connaissance prescriptive sous la forme

d'artefacts, qui peuvent être des construits (concepts, vocabulaires), des modèles (représentations, abstractions), des méthodes (algorithmes, pratiques) ou des instanciations (prototypes, systèmes implémentés).⁴⁶

Notre projet de recherche, visant à créer le cadriciel CAIA-EA, s'inscrit sans équivoque dans le second paradigme. Nous ne cherchons pas seulement à expliquer pourquoi les cadriciels existants sont inadéquats ; nous cherchons à construire une solution nouvelle et, nous l'espérons, plus utile.

2.2 Justification de la Design Science Research (DSR)

La DSR est la méthodologie la plus appropriée pour cette thèse pour plusieurs raisons.

Premièrement, elle est intrinsèquement liée à la **résolution de problèmes**. Notre point de départ est un problème clairement identifié dans le domaine de l'AE : l'inadéquation des approches traditionnelles face à la complexité et à la dynamique des organisations modernes. La DSR fournit un cadre rigoureux pour passer de l'identification d'un problème à la conception, au développement et à l'évaluation d'une solution.⁴⁷

Deuxièmement, la DSR vise à produire une **connaissance utile et prescriptive**. L'objectif final n'est pas une théorie purement descriptive, mais un "artefact" – le cadriciel CAIA-EA – qui incarne une connaissance actionnable. Cet artefact est conçu pour être une "règle technologique" que les professionnels (architectes d'entreprise, DSI) peuvent utiliser pour guider leurs actions.⁴⁸ Cette orientation vers la pertinence pratique est un pilier de la DSR.

Troisièmement, la DSR est un paradigme de **recherche constructive**. La connaissance et la compréhension d'un domaine problématique sont acquises à *travers* le processus de construction et d'application de l'artefact.⁴⁶ En tentant de concevoir le cadriciel CAIA-EA, nous sommes contraints de nous confronter en profondeur aux complexités théoriques des systèmes adaptatifs, des SMA et de l'interopérabilité. La conception de l'artefact n'est pas seulement le but de la recherche, c'est aussi son principal moyen d'investigation.

Enfin, la DSR s'aligne sur la production de connaissance de **Mode 2**, qui est une

recherche menée dans un contexte d'application, transdisciplinaire, et visant à résoudre des problèmes de terrain complexes et pertinents, par opposition à la connaissance de Mode 1, purement académique et monodisciplinaire.⁴⁸ Notre travail, en synthétisant des théories de l'informatique, de la gestion et des sciences de la complexité pour répondre à un défi organisationnel majeur, correspond parfaitement à cette définition.

2.3 Le Processus de DSR Appliqué à la Création du Cadriciel

Pour structurer notre démarche, nous adoptons un processus de DSR cyclique et itératif, largement inspiré du modèle de référence proposé par Hevner et al. (2004)⁴⁶ et d'autres cadres méthodologiques similaires.⁴⁷ Ce processus se décompose en six activités, qui correspondent directement à la structure de cette thèse.

1. **Identification du Problème et Motivation (Chapitre 1) :** La première étape consiste à définir le problème de recherche spécifique et à justifier l'intérêt de sa résolution. Cette activité a été réalisée dans le chapitre précédent, qui a établi l'inadéquation des cadriciels d'AE traditionnels et a motivé la nécessité d'un nouveau paradigme pour l'Entreprise Agentique.
2. **Définition des Objectifs de la Solution (Introduction) :** À partir du problème, nous définissons les objectifs qualitatifs et quantitatifs d'une solution acceptable. Ces objectifs, présentés dans l'introduction, consistent à créer un cadriciel capable de modéliser les propriétés cognitives, adaptatives et agentiques d'une organisation et d'assurer son interopérabilité.
3. **Conception et Développement (Chapitres 3 & 4) :** C'est le cœur du processus de DSR, où l'artefact est créé. Dans notre cas, l'artefact est un cadriciel, qui est une combinaison de construits (les concepts d'Agent, Rôle, Groupe), de modèles (le méta-modèle CAIA-EA) et de méthodes (les principes directeurs pour son application). Les chapitres 3 et 4 sont dédiés à la description détaillée de la conception et du développement de cet artefact, en s'appuyant sur les théories de base identifiées dans la revue de littérature.
4. **Démonstration (Chapitre 6) :** L'artefact doit être utilisé pour résoudre une ou plusieurs instances du problème. Le chapitre 6 réalise cette démonstration en appliquant le cadriciel CAIA-EA à deux cas d'étude théoriques (la chaîne logistique et les DAO), montrant comment il peut être utilisé pour analyser ces systèmes et proposer des architectures pertinentes.

5. **Évaluation (Chapitre 5 & Discussion) :** L'artefact doit être rigoureusement évalué pour déterminer dans quelle mesure il atteint les objectifs fixés. L'évaluation est une activité continue dans la DSR. Le chapitre 5, avec son auto-critique du cadrage et son analyse des risques, constitue une forme d'évaluation analytique. La discussion générale évaluera également la contribution globale de l'artefact par rapport à la littérature existante.
6. **Communication (La Thèse) :** La dernière étape consiste à communiquer le problème, l'artefact, sa justification et son évaluation à un public de chercheurs et de praticiens. La présente thèse dans son intégralité constitue cet acte de communication.

Ce processus est itératif. La construction de l'artefact (étape 3) nous éclaire sur la nature du problème (étape 1), et l'évaluation (étape 5) peut conduire à une révision de la conception.

2.4 Méthodes de Collecte et d'Analyse des Données

Étant donné la nature conceptuelle de notre recherche, les "données" ne sont pas des observations empiriques de terrain, mais plutôt des corpus de connaissance théorique et des modèles existants.

- **Collecte des Données :** La principale méthode de collecte a été une **revue de littérature systématique et critique**. Nous avons exploré plusieurs domaines académiques pour construire la base de connaissances ("knowledge base") nécessaire à la conception de l'artefact. Ces domaines incluent :
 - L'architecture d'entreprise (articles, ouvrages et spécifications de standards comme TOGAF et Zachman).
 - La science de l'interopérabilité (publications académiques, rapports de consortiums).
 - La théorie des systèmes complexes et adaptatifs.
 - L'intelligence artificielle et les systèmes multi-agents (articles de conférence et de journaux de référence comme ceux de l'IEEE et de l'ACM).
 - L'ingénierie des ontologies.
- **Analyse des Données :** La principale technique d'analyse est la **synthèse conceptuelle**. Ce processus implique :
 - **La Déconstruction :** L'analyse critique des modèles et théories existants pour en extraire les concepts fondamentaux, les forces et les faiblesses

(comme réalisé au chapitre 1).

- **La Synthèse** : L'intégration créative des concepts pertinents issus de domaines disparates pour construire un nouvel ensemble cohérent et intégré : le cadriciel CAIA-EA.
- **La Modélisation** : L'utilisation de formalismes (diagrammes, descriptions structurées, tableaux) pour représenter de manière claire et non ambiguë les construits du nouveau cadriciel et les relations qui les unissent. Cette modélisation est essentielle pour communiquer la structure et la logique de l'artefact.

2.5 Considérations Éthiques et Limites de l'Étude

Bien que notre recherche soit de nature conceptuelle, elle n'est pas exempte de considérations éthiques. La conception d'un cadriciel pour des entreprises peuplées d'agents d'IA autonomes soulève des questions de **responsabilité** (qui est responsable en cas d'erreur d'un agent?), de **transparence** (les décisions des agents doivent-elles être explicables?) et de **biais** (comment s'assurer que les agents n'apprennent pas et ne perpétuent pas des biais discriminatoires?).³⁴ En proposant un tel cadriciel, nous avons la responsabilité de souligner ces risques et d'intégrer, dans la mesure du possible, des principes de conception qui les atténuent (par exemple, en insistant sur le rôle de la gouvernance et de la supervision humaine).

La principale **limite** de cette étude réside dans la nature de son évaluation. Conformément à de nombreuses recherches en DSR qui proposent des artefacts de haut niveau, l'évaluation du cadriciel CAIA-EA est principalement **analytique et démonstrative**, basée sur des arguments logiques et des cas d'étude théoriques. Nous ne procédons pas à une validation empirique complète via une implémentation réelle dans une organisation, ce qui constituerait un projet de recherche à part entière. Cette limitation est reconnue et sera présentée comme une voie majeure pour les recherches futures.

En conclusion, la méthodologie de la Science de la Conception fournit un cadre robuste, rigoureux et adapté à l'ambition de cette thèse : non seulement critiquer le passé, mais surtout, construire l'avenir de l'architecture d'entreprise.

Chapitre 3 : Le Méta-Modèle CAIA-EA – Principes et Composants Fondamentaux

Après avoir établi la nécessité d'un nouveau paradigme d'architecture d'entreprise et justifié notre approche méthodologique, ce chapitre présente le cœur de notre contribution : le méta-modèle du Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA). Ce méta-modèle ne se contente pas de décrire des boîtes et des flèches ; il incarne une nouvelle philosophie de l'organisation. Nous commencerons par exposer les principes directeurs qui sous-tendent le cadriciel. Ensuite, nous détaillerons sa structure organisationnelle fondamentale, inspirée des systèmes multi-agents. Enfin, nous explorerons sa dimension cognitive, qui modélise l'intelligence distribuée de l'Entreprise Agentique.

3.1 Principes Directeurs : Autonomie, Co-évolution et Gouvernance Décentralisée

Le cadriciel CAIA-EA repose sur un ensemble de principes fondateurs qui le distinguent radicalement des approches traditionnelles. Ces principes ne sont pas de simples recommandations, mais des axiomes qui façonnent l'ensemble de l'architecture.

- **Principe d'Autonomie** : Au sein de l'Entreprise Agentique, les agents sont considérés comme des citoyens de première classe. Qu'ils soient humains, des équipes ou des systèmes d'IA, ils possèdent un certain degré d'autonomie pour prendre des décisions et agir en fonction de leurs objectifs locaux et de leur perception de l'environnement.³⁷ L'architecture ne cherche pas à micro-manager leurs actions par des processus rigides, mais plutôt à leur fournir le contexte, les ressources et les règles d'interaction nécessaires pour qu'ils puissent agir de manière intelligente et coordonnée. L'autonomie est la source de l'agilité et de la proactivité du système.
- **Principe de Co-évolution** : L'entreprise et son environnement sont engagés dans une danse perpétuelle d'adaptation mutuelle. L'architecture ne doit pas être conçue comme une structure figée et optimisée pour un état futur prédéfini, car cet état n'advient jamais tel que prévu. Au contraire, l'architecture doit être un

système adaptatif lui-même, capable de se reconfigurer et d'évoluer en réponse aux changements internes et externes.³⁰ Ce principe implique que l'architecture doit privilégier la modularité, la flexibilité et les mécanismes d'apprentissage par rapport à la rigidité et à l'optimisation prématurée.

- **Principe de Gouvernance Décentralisée** : Le contrôle et la coordination ne sont pas l'apanage d'une autorité centrale, mais émergent des interactions régulées entre les agents autonomes. La gouvernance dans le CAIA-EA ne s'exerce pas par le commandement, mais par la définition de "règles du jeu" : protocoles de communication, normes de comportement, politiques d'accès aux ressources et objectifs partagés.³⁷ Ce modèle s'inspire des systèmes naturels et des organisations décentralisées, où l'ordre global émerge de la simplicité des règles locales. La gouvernance devient alors un acte de "jardinage" d'écosystème plutôt que de "planification" d'usine.

3.2 Le Méta-Modèle Organisationnel : Agents, Rôles, et Collectifs

Pour traduire ces principes en une structure modélisable, le CAIA-EA propose un méta-modèle organisationnel directement inspiré des travaux sur les systèmes multi-agents, et plus particulièrement du modèle Agent-Groupe-Rôle (AGR) popularisé par des cadres comme AALAADIN.⁴³ Ce méta-modèle offre un vocabulaire pour décrire la structure sociale et dynamique de l'Entreprise Agentique.

3.2.1 L'Agent

L'**Agent** est l'entité fondamentale du méta-modèle. Il représente toute entité capable d'action autonome au sein de l'entreprise.

- **Définition** : Un agent est une entité encapsulée qui possède un état interne, des capacités (actions qu'il peut exécuter) et un comportement. Il perçoit son environnement et agit de manière autonome pour atteindre ses objectifs.
- **Typologie** : Le méta-modèle distingue plusieurs types d'agents pour refléter la nature socio-technique de l'entreprise :
 - **Agents Humains** : Individus ou équipes.
 - **Agents Artificiels** : Systèmes logiciels ou matériels dotés d'autonomie.

Ceux-ci peuvent être classés selon leur complexité : agents réactifs (agissant sur des stimuli simples), agents délibératifs (capables de planifier leurs actions) et agents cognitifs (dotés de capacités d'apprentissage et de raisonnement avancées, souvent basés sur des modèles de type BDI - Belief-Desire-Intention).³⁷

3.2.2 Le Rôle

Le **Rôle** est un concept clé qui apporte une flexibilité immense à l'architecture. Il dissocie la fonction de l'acteur.

- **Définition** : Un rôle est une spécification abstraite d'un comportement attendu, d'un ensemble de permissions et d'obligations au sein d'un contexte de collaboration spécifique (un Groupe).⁴³ Par exemple, dans un processus de vente, on trouvera les rôles de "Commercial", "Expert Technique" et "Approbateur Financier".
- **Dynamisme** : Un agent n'est pas défini par un rôle unique et statique. Un même agent (par exemple, un employé ou un système d'IA) peut jouer dynamiquement plusieurs rôles dans différents contextes. Inversement, un même rôle peut être tenu par différents agents (humains ou artificiels) pourvu qu'ils possèdent les capacités requises. Cette dissociation est le moteur de l'adaptativité : face à une perturbation, le système n'a pas besoin de restructurer l'organigramme, mais de trouver un agent disponible capable d'endosser le rôle nécessaire à la résolution du problème.

3.2.3 Le Collectif (ou Groupe)

Le **Collectif** (ou Groupe) est la structure qui organise la collaboration.

- **Définition** : Un collectif est une agrégation dynamique d'agents, jouant des rôles complémentaires, qui collaborent pour atteindre un objectif commun.⁴³ Les collectifs peuvent être éphémères (une "task force" pour résoudre un incident) ou pérennes (une équipe produit). Ils définissent un contexte d'interaction, avec des règles et des ressources partagées.
- **Modularité et Scalabilité** : La structuration de l'entreprise en collectifs permet

une grande modularité. Des problèmes complexes peuvent être décomposés et assignés à des collectifs spécialisés, qui opèrent avec une forte autonomie.⁵⁶ Cette approche favorise également la scalabilité, car de nouveaux agents ou de nouveaux collectifs peuvent être ajoutés au système sans perturber l'ensemble.

Ce méta-modèle AGR transforme la vision de l'entreprise. On ne la décrit plus par un organigramme rigide de postes et de départements, mais comme un écosystème dynamique où des agents aux capacités variées forment des collectifs pour atteindre des objectifs, en endossant les rôles nécessaires à la collaboration. C'est une architecture conçue pour le mouvement et l'adaptation.

3.3 La Dimension Cognitive : Mémoire, Apprentissage et Raisonnement

Une Entreprise Agentique n'est pas seulement adaptative, elle est aussi cognitive. Son intelligence n'est pas centralisée au sommet, mais distribuée parmi ses agents et incarnée dans ses processus d'interaction. Le cadriciel CAIA-EA doit donc modéliser cette dimension cognitive.

- **Mémoire Organisationnelle** : La capacité à retenir et à exploiter l'expérience passée est cruciale. Dans le CAIA-EA, la mémoire est un concept distribué :
 - **Mémoire Explicite** : Elle est matérialisée par des bases de connaissances partagées, des ontologies d'entreprise et des graphes de connaissances qui formalisent le savoir collectif.
 - **Mémoire Implicite** : Elle est encapsulée dans l'état interne et les modèles de comportement des agents. Un agent d'IA, par exemple, conserve une "mémoire" de ses interactions passées pour personnaliser ses réponses futures.⁵⁷ La persistance de la mémoire des agents est une capacité architecturale clé.
- **Apprentissage et Adaptation** : L'apprentissage est le processus par lequel la mémoire est mise à jour et les comportements sont améliorés. Le cadriciel modélise l'apprentissage à plusieurs niveaux :
 - **Apprentissage Individuel** : Chaque agent (humain ou IA) apprend de ses propres actions et de leurs conséquences, via des boucles de rétroaction. Les algorithmes d'apprentissage automatique (supervisé, non supervisé, par renforcement) sont les mécanismes formels de cet apprentissage pour les

agents artificiels.³¹

- **Apprentissage Collectif** : Les collectifs apprennent et s'adaptent en modifiant leurs schémas d'interaction, leurs règles de coordination ou la distribution des rôles entre leurs membres. C'est à ce niveau qu'émergent de nouvelles routines organisationnelles.
- **Raisonnement et Prise de Décision** : Le cadriciel doit permettre de modéliser comment les agents prennent des décisions. Cela va de simples règles "si-alors" pour des agents réactifs à des processus de délibération complexes pour des agents cognitifs. Les modèles **BDI (Belief-Desire-Intention)** sont particulièrement pertinents ici.⁵⁰ Ils modélisent un agent comme ayant :
 - Des **Croyances (Beliefs)** : Sa représentation du monde.
 - Des **Désirs (Desires)** : Ses objectifs à atteindre.
 - Des Intentions (Intentions) : Les objectifs qu'il s'est engagé à poursuivre.Ce modèle permet de décrire un comportement rationnel et orienté vers un but, qui est au cœur de l'agentivité.

En intégrant explicitement ces composants cognitifs dans le méta-modèle, le CAIA-EA fournit un langage pour architecturer non seulement la structure de l'entreprise, mais aussi son intelligence collective et sa capacité à apprendre et à évoluer.

Chapitre 4 : La Dimension d'Interopérabilité du Cadriciel CAIA-EA

Le méta-modèle organisationnel décrit dans le chapitre précédent fournit la structure sociale de l'Entreprise Agentique. Cependant, pour que cette structure soit vivante et fonctionnelle, les agents qui la composent doivent pouvoir interagir de manière fluide et efficace. Ce chapitre détaille la dimension d'interopérabilité du cadriciel CAIA-EA, qui constitue le système nerveux de l'organisation. Conformément à l'analyse menée dans la revue de littérature, cette dimension est stratifiée en trois couches interdépendantes : technique, sémantique et organisationnelle. Chaque couche répond à un besoin spécifique de la collaboration agentique.

4.1 Interopérabilité Technique : Protocoles de Communication

Agent

La couche d'interopérabilité technique est le fondement de toute communication. Elle fournit les mécanismes et les protocoles qui permettent aux agents d'échanger des messages de manière fiable, indépendamment de leur plateforme d'implémentation ou de leur localisation physique.

Dans le contexte des systèmes multi-agents, de simples appels d'API ou des échanges de données brutes sont insuffisants. Une communication entre agents autonomes et intelligents doit être plus structurée et expressive. C'est pourquoi le cadre CAIA-EA préconise l'adoption de **Langages de Communication pour Agents (Agent Communication Languages - ACL)**.⁵⁸ Un ACL n'est pas un simple format de données, mais un protocole qui traite les messages comme des

actes de communication, inspirés de la théorie des actes de langage en philosophie.⁵⁸ Chaque message a une intention pragmatique explicite.

Le standard de référence dans ce domaine est le **FIPA-ACL** (Foundation for Intelligent Physical Agents).⁶⁰ La structure d'un message FIPA-ACL est riche et standardisée, contenant plusieurs paramètres clés ⁶¹ :

- **Performative** : Le paramètre le plus important, qui définit l'intention du message (l'acte de communication). Il existe une vingtaine de performatives standardisées, telles que inform (pour énoncer un fait), request (pour demander une action), query-if (pour poser une question), propose (pour faire une proposition dans une négociation), accept-proposal, reject-proposal, etc.
- **Sender / Receiver** : L'identité de l'émetteur et du ou des destinataires.
- **Content** : Le contenu factuel du message, ce sur quoi porte l'acte de communication.
- **Language / Ontology** : Des paramètres qui spécifient le langage dans lequel le contenu est exprimé et l'ontologie à utiliser pour interpréter les symboles de ce contenu.
- **Protocol / Conversation-ID** : Des paramètres pour gérer le déroulement de conversations plus longues, en indiquant à quel protocole d'interaction le message appartient (par exemple, un protocole d'enchères ou de négociation) et en identifiant la conversation spécifique.⁶²

En adoptant une norme comme FIPA-ACL, le cadre CAIA-EA assure que les agents, même hétérogènes, disposent d'un moyen de communication robuste et expressif,

jetant ainsi les bases d'une collaboration complexe.

4.2 Interopérabilité Sémantique : Le Rôle Central des Ontologies Partagées

Si l'interopérabilité technique fournit le "comment" de la communication, l'interopérabilité sémantique fournit le "quoi". Elle garantit que les agents partagent une compréhension commune du domaine sur lequel ils communiquent, ce qui est la condition sine qua non de toute collaboration intelligente. Au sein du CAIA-EA, cette couche est matérialisée par l'ingénierie et l'utilisation d'**ontologies d'entreprise partagées**.

Une ontologie est une spécification formelle et explicite des concepts, propriétés et relations d'un domaine de connaissance.⁶⁴ Elle agit comme un dictionnaire et une grammaire conceptuels pour les agents. Lorsque deux agents échangent un message FIPA-ACL dont le contenu fait référence à un concept comme "CommandeClient", l'ontologie garantit qu'ils s'accordent sur la définition de ce concept, ses attributs (ex:

date, montant, client) et ses relations avec d'autres concepts (ex: une CommandeClient est liée à un ou plusieurs Produits).

L'ingénierie ontologique en contexte d'entreprise présente cependant des défis importants :

- **Développement et Maintenance** : La création d'ontologies est un processus complexe et coûteux qui nécessite une expertise de domaine et une expertise en modélisation.⁶⁶ De plus, dans un environnement dynamique, les ontologies doivent constamment évoluer pour refléter les changements dans le métier, ce qui pose des problèmes de gestion de versions et de maintien de la cohérence.⁶⁵
- **Interopérabilité des Ontologies** : Les différentes parties de l'entreprise ou les différents partenaires d'un écosystème peuvent développer leurs propres ontologies, ce qui crée un nouveau problème d'interopérabilité au niveau sémantique. Des techniques d'alignement et de fusion d'ontologies sont alors nécessaires, mais elles sont complexes à mettre en œuvre.⁶⁴

Pour relever ces défis, le CAIA-EA préconise une approche modulaire et fédérée, s'appuyant sur des ontologies de référence standardisées. Le domaine de la chaîne

logistique offre un excellent exemple. Des initiatives comme l'**Industrial Ontologies Foundry (IOF)** développent des ontologies de référence comme la **Supply Chain Reference Ontology (SCRO)**.⁶⁹ De même, des standards comme le modèle

SCOR ont été utilisés comme base pour créer des ontologies partagées.⁷¹ En adoptant ou en s'alignant sur de telles ontologies de référence, les agents d'une chaîne logistique peuvent communiquer sans ambiguïté sur les flux, les ressources, les activités et les acteurs, permettant une visibilité et une coordination de bout en bout.

La combinaison d'un langage de communication formel (FIPA-ACL) et d'un vocabulaire partagé (ontologie) crée une sorte de "contrat social" pour les agents. L'ACL définit les règles de la conversation, tandis que l'ontologie définit la réalité partagée sur laquelle porte cette conversation. La gestion des ontologies devient ainsi une discipline aussi critique que la gestion des API dans l'architecture d'une Entreprise Agentique.

4.3 Interopérabilité Organisationnelle : Normes, Politiques et Processus Coordonnés

La dernière couche, l'interopérabilité organisationnelle, garantit que les interactions techniquement possibles et sémantiquement comprises sont également cohérentes, productives et alignées sur les objectifs de l'entreprise. Elle fournit le cadre de gouvernance pour la société d'agents.

- **Gouvernance par les Normes** : Dans un système décentralisé, le contrôle direct est remplacé par une gouvernance indirecte basée sur des normes. Le comportement des agents est contraint par un ensemble de règles, de politiques et de normes sociales partagées qui définissent ce qui est permis, obligatoire ou interdit dans un contexte donné.⁷³ Ces normes peuvent être encodées dans les agents eux-mêmes ou dans l'environnement (par exemple, dans des contrats intelligents sur une blockchain). Ce principe de "l'autonomie contrainte" permet de concilier la flexibilité locale des agents avec la cohérence globale du système.
- **Coordination des Processus Métier** : La gestion des processus métier (BPM) est transformée. Les workflows rigides et centralisés de type BPMN sont remplacés par des mécanismes de coordination dynamiques. Un processus métier est vu comme le résultat de la collaboration d'un collectif d'agents.⁷⁴ La

réalisation d'une tâche complexe n'est pas prédéfinie dans un diagramme, mais émerge de protocoles de négociation et d'allocation de tâches, comme le **Contract Net Protocol**. Dans ce protocole, un agent ayant besoin d'un service ("manager") annonce la tâche ; les agents capables de la réaliser ("bidders") soumettent des propositions ; le manager sélectionne la meilleure proposition et établit un "contrat" avec l'agent choisi. Cette approche permet une allocation des ressources beaucoup plus flexible et résiliente.⁷⁶

- **Mécanismes de Confiance et de Réputation** : Dans un environnement ouvert et décentralisé, la confiance ne peut être présumée. Les agents doivent pouvoir évaluer la fiabilité de leurs pairs. Le cadriciel CAIA-EA doit donc prévoir des mécanismes de gestion de la réputation, où les agents notent leurs interactions passées.⁷⁷ Un agent peut alors décider de ne collaborer qu'avec des partenaires ayant une réputation élevée, créant ainsi un système d'incitation à un comportement coopératif et fiable. Ces mécanismes sont essentiels pour la sécurité et la robustesse de l'écosystème.⁵¹

Ensemble, ces trois couches d'interopérabilité forment une architecture complète pour la communication et la collaboration au sein de l'Entreprise Agentique, permettant aux agents de passer de simples échanges de données à une coordination intelligente et finalisée.

Chapitre 5 : Analyse des Dynamiques, Risques et Auto-Critique

La conception d'un cadriciel aussi ambitieux que le CAIA-EA ne peut se faire sans une analyse approfondie de ses dynamiques potentielles et une reconnaissance lucide de ses risques et de ses limites. Conformément à la méthodologie de la science de la conception, cette phase d'évaluation est cruciale. Ce chapitre se veut une réflexion critique sur le cadriciel proposé. Nous commencerons par présenter la modélisation basée sur les agents (ABM) comme un outil pour explorer les comportements émergents du système. Nous aborderons ensuite les critiques inhérentes à cette méthode de simulation. Puis, nous analyserons les risques systémiques propres à l'Entreprise Agentique. Enfin, nous conclurons par une auto-critique du cadriciel CAIA-EA lui-même, identifiant ses défis et ses angles morts.

5.1 Modélisation et Simulation via l'Approche Basée sur les Agents (ABM)

Pour comprendre comment une entreprise architecturée selon les principes du CAIA-EA pourrait se comporter, les méthodes d'analyse traditionnelles sont souvent insuffisantes en raison des non-linéarités et des effets d'émergence. La **Modélisation Basée sur les Agents (Agent-Based Modeling - ABM)** offre une approche de simulation "ascendante" (bottom-up) particulièrement adaptée.⁷⁸

L'ABM consiste à créer un modèle computationnel composé d'agents autonomes qui suivent des règles de comportement simples et interagissent entre eux et avec un environnement simulé.⁸¹ En exécutant la simulation, on peut observer les motifs et les structures macroscopiques qui émergent de ces interactions microscopiques. Dans notre contexte, l'ABM peut être utilisée comme un "laboratoire virtuel" pour :

- **Explorer les dynamiques émergentes** : Simuler comment des changements dans les règles de communication des agents, leurs stratégies de négociation ou la structure des collectifs peuvent affecter la performance globale, la résilience ou la culture de l'organisation.
- **Tester des hypothèses** : Évaluer l'impact de différentes politiques de gouvernance (par exemple, centralisées vs. décentralisées) sur l'efficacité de la coordination ou la vitesse d'adaptation.
- **Anticiper les risques** : Identifier les conditions qui pourraient conduire à des comportements collectifs indésirables, comme des blocages, des oscillations ou des défaillances en cascade.⁸²

L'ABM est donc un outil puissant pour "donner vie" au cadriceil CAIA-EA et pour développer une intuition sur ses propriétés dynamiques, au-delà de sa description statique.

5.2 Critique de l'Approche ABM et Biais Cognitifs du Modélisateur

Pour maintenir une rigueur académique, il est essentiel de reconnaître les limites et les

critiques de la méthode ABM. L'utilisation de l'ABM n'est pas une panacée et doit être abordée avec un esprit critique.

- **Simplification et Réductionnisme** : Une critique fréquente est que les modèles ABM, pour rester calculables, simplifient à l'extrême le comportement des agents et la complexité de l'environnement. Ils risquent de promouvoir une vision individualiste et de négliger les forces structurelles, sociales et historiques qui façonnent les comportements.⁸⁴ Un modèle de ségrégation résidentielle, par exemple, peut être critiqué s'il se concentre uniquement sur les préférences individuelles en ignorant les facteurs institutionnels et économiques.
- **Le Défi de la Validation** : Valider un modèle ABM par rapport à des données du monde réel est notoirement difficile, surtout pour les systèmes sociaux.⁸⁴ La complexité du modèle et le grand nombre de paramètres rendent souvent le calibrage et la vérification empirique ardu. Cela soulève la question de la crédibilité des résultats de la simulation.
- **Le Biais du Modélisateur ("You get out what you put in")** : Une autre critique, souvent formulée par les chercheurs en sciences sociales, est que les résultats d'une simulation ne font que refléter les hypothèses et les règles que le modélisateur y a intégrées.⁸⁶ Le modèle ne découvrirait rien de nouveau, mais ne ferait que dérouler la logique de son créateur.

En réponse à ces critiques, notre utilisation de l'ABM dans le cadre de cette thèse est positionnée non pas comme un outil de **prédiction** quantitative précise, mais comme un outil d'**exploration heuristique** et de **construction théorique**.⁸¹ L'objectif n'est pas de prédire l'avenir d'une entreprise, mais de comprendre les

mécanismes potentiels qui peuvent générer certains types de comportements collectifs. Il s'agit d'un "outil pour penser", pour explorer les conséquences logiques de nos hypothèses sur l'Entreprise Agentique et pour identifier des phénomènes émergents contre-intuitifs qui méritent une analyse plus approfondie.⁸⁶

5.3 Risques Inhérents à l'Entreprise Agentique : Défaillances en Cascade et Perte de Contrôle

L'architecture proposée par le CAIA-EA, en embrassant la complexité et la décentralisation, introduit également de nouveaux types de risques systémiques qui

doivent être gérés.

- **Défaillances en Cascade** : L'interconnexion étroite entre les agents et les collectifs, bien que source d'efficacité, crée également une vulnérabilité aux défaillances en cascade.²⁷ Une erreur mineure dans le code d'un agent critique, une donnée corrompue ou une défaillance matérielle localisée peut se propager rapidement à travers le réseau d'interactions, potentiellement paralysant des pans entiers de l'organisation.²⁷ La forte dépendance à des modèles d'IA fondamentaux (foundation models) partagés par de nombreux agents peut également créer un point de défaillance unique à grande échelle.²⁷
- **Comportements Émergents Négatifs** : L'émergence n'est pas toujours bénéfique. Des interactions non supervisées entre agents peuvent conduire à des résultats collectifs indésirables. Par exemple, des agents optimisant leurs objectifs locaux pourraient entrer en compétition pour une ressource partagée, conduisant à une "tragédie des communs" numérique.⁹⁰ Des agents d'IA pourraient également apprendre et amplifier des biais présents dans les données, menant à des décisions discriminatoires à grande échelle.³⁴ La détection et l'analyse de ces comportements émergents sont un défi majeur pour la surveillance des systèmes multi-agents.⁹⁰
- **Défis de Sécurité, de Surveillance et de Débogage** : La nature distribuée, autonome et dynamique de l'Entreprise Agentique rend les approches traditionnelles de la sécurité et de la maintenance logicielle obsolètes.
 - **Sécurité** : Chaque agent autonome est une surface d'attaque potentielle. Des agents malveillants pourraient infiltrer le système, fournir de fausses informations ou refuser de coopérer, nécessitant des mécanismes de confiance et de réputation robustes.⁷⁷
 - **Surveillance (Observability)** : Suivre une transaction ou un processus qui traverse de multiples agents autonomes est extrêmement complexe. Il est difficile de reconstituer la chaîne causale des événements, ce qui rend le diagnostic des problèmes ardu.⁹⁰
 - **Débogage** : Les erreurs dans un système multi-agents peuvent être le résultat d'interactions complexes et non d'un bug dans un seul composant. Le débogage devient alors une tâche d'analyse systémique plutôt que d'analyse de code.⁹³

5.4 Auto-Critique du Cadriciel CAIA-EA

Enfin, une évaluation honnête de notre propre proposition est nécessaire. Le cadriciel CAIA-EA, bien que théoriquement séduisant, présente plusieurs défis et limites importants qui doivent être reconnus.

- **Complexité de Mise en Œuvre :** Le principal contre-argument est la complexité et le coût de sa mise en œuvre. Passer d'une organisation traditionnelle à une Entreprise Agentique est une transformation radicale qui va bien au-delà de la technologie. Elle exige une maturité organisationnelle, des compétences avancées en IA et en ingénierie logicielle, ainsi qu'un changement culturel profond vers la confiance, l'autonomie et l'expérimentation.
- **Ambiguïté de la Gouvernance et de la Responsabilité :** Le principe de gouvernance décentralisée, bien que puissant, crée un flou juridique et éthique. Qui est légalement et moralement responsable lorsqu'un collectif d'agents autonomes prend une décision qui cause un préjudice financier ou humain? Le cadriciel propose des mécanismes de coordination, mais ne résout pas entièrement cette question fondamentale de la responsabilité distribuée, un problème bien connu dans le domaine des DAO.⁹⁴
- **Le Rôle de l'Humain et le Risque de Déshumanisation :** En modélisant les humains et les systèmes d'IA comme des "agents" de même nature, le cadriciel risque de promouvoir une vision trop techniciste de l'organisation. Il est crucial de ne pas réduire l'employé à un simple nœud dans un réseau de calcul. Le cadriciel doit être utilisé pour augmenter et habiliter l'intelligence humaine, pas pour la remplacer ou la marginaliser. Une symbiose homme-machine efficace, où l'humain reste "dans la boucle" pour les décisions critiques, doit être un principe de conception fondamental, et non une réflexion après coup.¹⁴

Cette analyse critique ne vise pas à invalider le cadriciel CAIA-EA, mais à en délimiter le périmètre de validité et à identifier les domaines où des recherches et des réflexions supplémentaires sont impératives. Elle constitue une étape essentielle du cycle de la science de la conception, où l'évaluation de l'artefact ouvre la voie à de futures améliorations.

Chapitre 6 : Applications et Implications du Cadriciel CAIA-EA

Après avoir défini le méta-modèle du cadriciel CAIA-EA et analysé ses dynamiques, ce chapitre vise à démontrer son utilité pratique. Conformément à la méthodologie de la science de la conception, un artefact doit prouver sa valeur en résolvant des problèmes pertinents. Nous appliquerons donc le cadriciel à deux domaines complexes et d'actualité : la gestion de la chaîne logistique et la gouvernance des organisations autonomes décentralisées (DAO). Ces cas d'étude théoriques illustreront comment les concepts du CAIA-EA peuvent être utilisés pour analyser ces systèmes et concevoir des architectures plus résilientes et intelligentes. Enfin, nous discuterons des implications plus larges de cette approche pour le rôle des architectes d'entreprise et des dirigeants technologiques.

6.1 Cas d'Étude Théorique 1 : La Chaîne Logistique Intelligente et Résiliente

Les chaînes logistiques modernes sont des systèmes complexes, globaux et fragiles. Elles sont confrontées à des défis majeurs qui mettent en évidence les limites des approches de gestion traditionnelles.

Le Problème :

Les chaînes logistiques souffrent de plusieurs maux endémiques. Le plus connu est l'effet coup de fouet (bullwhip effect), où de petites variations de la demande finale du consommateur sont amplifiées à chaque maillon en amont de la chaîne (détaillant, distributeur, fabricant, fournisseur), conduisant à des fluctuations massives des commandes et des stocks, et donc à des inefficacités et des coûts élevés.⁹⁶ À cela s'ajoutent un **manque de visibilité de bout en bout**, où chaque acteur n'a qu'une vision partielle et différée de l'état global de la chaîne, et une **faible résilience face aux perturbations** (géopolitiques, climatiques, sanitaires), qui peuvent provoquer des ruptures d'approvisionnement coûteuses.⁹⁸

Application du Cadriciel CAIA-EA :

Le cadriciel CAIA-EA offre un paradigme radicalement différent pour concevoir et opérer une chaîne logistique.

- **Modélisation Agentique** : Chaque entité de la chaîne (fournisseur, usine, entrepôt, transporteur, détaillant) est modélisée non pas comme un maillon passif, mais comme un **agent autonome** doté d'objectifs propres (ex: minimiser

ses coûts, maximiser son taux de service) et de capacités de décision.¹⁰⁰ La chaîne logistique devient un système multi-agents (SMA).

- **Interopérabilité pour la Visibilité** : Le manque de visibilité est directement adressé par les couches d'interopérabilité.
 - **Technique et Sémantique** : Les agents communiquent en temps réel via un langage standard (ACL) et, surtout, partagent une **ontologie commune de la chaîne logistique** (comme la SCRO).⁶⁹ Cela permet un échange d'informations (niveaux de stock, temps de transit, prévisions de demande) fluide et sans ambiguïté, créant une source de vérité partagée.
 - **Le Jumeau Numérique (Digital Twin)** : Cette visibilité partagée permet la création d'un **jumeau numérique** de la chaîne logistique. Ce jumeau est une réplique virtuelle, dynamique et en temps réel de l'ensemble du réseau physique, qui sert de support à la simulation, à la prédiction et à l'optimisation.¹⁰² Il est l'incarnation parfaite d'une architecture cognitivo-adaptative, permettant de tester des scénarios "what-if" et d'anticiper les problèmes avant qu'ils ne surviennent.¹⁰⁵
- **Cognition et Adaptation pour la Résilience** : L'intelligence est distribuée dans le système pour le rendre adaptatif.
 - **Agents Cognitifs** : Des agents spécialisés utilisent l'apprentissage automatique pour des tâches cognitives. Des **agents de prévision de la demande** analysent les données de vente en temps réel pour générer des prévisions plus précises et partagées, atténuant ainsi l'une des causes principales de l'effet coup de fouet.¹⁰⁰
 - **Négociation et Coordination Dynamique** : Face à une perturbation (ex: la fermeture d'un port), les agents ne suivent pas un plan rigide. L'**agent transporteur** concerné signale l'incident. D'autres agents logistiques peuvent alors négocier dynamiquement de nouvelles routes. L'**agent de production** peut ajuster son planning et négocier avec des **agents fournisseurs** alternatifs pour sécuriser les approvisionnements. Cette coordination décentralisée permet une réponse à la perturbation beaucoup plus rapide et flexible qu'une replanification centrale.¹⁰⁸

Le tableau suivant résume comment les composants du CAIA-EA répondent aux défis spécifiques de la chaîne logistique.

Tableau 6.1 : Application du Cadriciel CAIA-EA aux Défis de la Chaîne Logistique

Défi de la Chaîne Logistique	Solution via le Cadriciel CAIA-EA
------------------------------	-----------------------------------

Effet Coup de Fouet (Bullwhip Effect)	Agents cognitifs de prévision de la demande utilisant le ML pour des prévisions partagées et précises. Négociation autonome entre les agents d'inventaire, de production et de fourniture pour lisser les commandes et optimiser les stocks de manière collaborative.
Manque de Visibilité de Bout en Bout	Interopérabilité sémantique via une ontologie partagée (ex: SCRO) assurant une compréhension commune des données. Les agents rapportent leur état en temps réel à un jumeau numérique de la chaîne, offrant une vue globale et dynamique.
Ruptures et Perturbations	Agents adaptatifs (ex: logistiques) qui détectent les perturbations et recalculent les plans en temps réel. Formation dynamique de "collectifs" d'agents (fournisseurs, transporteurs, producteurs) pour gérer la crise et trouver des solutions alternatives.
Inefficacités Logistiques	Allocation dynamique des tâches aux agents logistiques via des protocoles de négociation (ex: Contract Net) pour optimiser l'utilisation des ressources (véhicules, entrepôts) en fonction des besoins réels et non de plans statiques.

6.2 Cas d'Étude Théorique 2 : L'Organisation Autonome Décentralisée (DAO)

Les DAO sont une forme émergente d'organisation native du Web3, fonctionnant sur la base de contrats intelligents (smart contracts) sur une blockchain. Elles incarnent la promesse d'une gouvernance entièrement décentralisée et transparente.

Le Problème :

En pratique, les DAO sont confrontées à de graves défis de gouvernance qui menacent leur viabilité et leur idéal décentralisateur.⁵¹ Les principaux problèmes sont :

- **Ploutocratie** : La plupart des DAO utilisent un vote basé sur le nombre de jetons

de gouvernance détenus ("one token, one vote"), ce qui conduit à une concentration du pouvoir entre les mains de quelques "baleines" (grands détenteurs de jetons).⁵¹

- **Apathie des Votants** : La participation aux votes est souvent extrêmement faible, ce qui rend difficile l'atteinte du quorum et remet en question la légitimité des décisions.⁹⁴
- **Inefficacité** : Le processus de proposition et de vote pour chaque décision peut être lent et coûteux, paralysant l'organisation pour les décisions opérationnelles.¹¹¹
- **Ambiguïté Légale** : Le statut juridique des DAO est incertain dans la plupart des juridictions, ce qui crée des risques de responsabilité personnelle pour leurs membres.⁹⁵

Application du Cadriciel CAIA-EA :

Le CAIA-EA offre un méta-modèle beaucoup plus riche pour penser et structurer la gouvernance d'une DAO, au-delà du simple vote par jeton.

- **Agents et Rôles pour une Gouvernance Sophistiquée** : Les membres de la DAO sont des **agents**. Le concept de **Rôle** du CAIA-EA permet de mettre en œuvre des mécanismes de gouvernance plus nuancés. Au lieu d'un pouvoir de vote uniforme, on peut définir des rôles avec des droits et des responsabilités spécifiques. Par exemple :
 - **Rôle d'Expert** : Des agents reconnus pour leur expertise dans un domaine (ex: sécurité, finance) pourraient avoir un poids de vote plus important sur les propositions relatives à ce domaine.
 - **Rôle de Délégué** : Pour contrer l'apathie, les agents pourraient déléguer leur pouvoir de vote à des agents-délégués de confiance qui s'engagent à participer activement (démocratie liquide).¹¹¹
 - **Rôles Opérationnels** : Des collectifs d'agents pourraient se voir attribuer des rôles avec des budgets et une autonomie pour gérer des aspects opérationnels, évitant de soumettre chaque décision mineure à un vote de toute l'organisation.
- **Interopérabilité Organisationnelle comme Constitution** : La couche d'interopérabilité organisationnelle du CAIA-EA fournit un cadre pour formaliser la "constitution" de la DAO. Les **normes, politiques et processus de coordination** peuvent être définis de manière explicite et transparente, puis implémentés dans les contrats intelligents. Cela inclut les règles de création et d'attribution des rôles, les protocoles de prise de décision pour différents types de problèmes, et les mécanismes de résolution de conflits.
- **Adaptation et Évolution de la Gouvernance** : Le principe de co-évolution du CAIA-EA est ici crucial. La gouvernance d'une DAO ne devrait pas être gravée

dans le marbre. Le cadriciel permet de concevoir la gouvernance elle-même comme un système adaptatif. La DAO pourrait avoir des méta-règles permettant de faire évoluer ses propres mécanismes de gouvernance en réponse à sa croissance, à des changements dans son environnement ou à l'analyse de ses performances passées.

En appliquant le CAIA-EA, une DAO peut passer d'un modèle de gouvernance simpliste et fragile à une structure organisationnelle sophistiquée, modulaire et adaptative, se rapprochant davantage de l'idéal d'une véritable intelligence collective décentralisée.

6.3 Implications pour les Architectes d'Entreprise et les Dirigeants (CIO/CTO)

L'adoption, même partielle, des principes du CAIA-EA a des implications profondes pour les leaders technologiques et les praticiens de l'architecture d'entreprise.

- **Le Nouveau Rôle de l'Architecte d'Entreprise** : Le rôle de l'architecte d'entreprise subit une transformation fondamentale. Il n'est plus le "planificateur urbain" qui dessine des plans directeurs détaillés et rigides. Il devient un **"jardinier d'écosystème"** ou un **"concepteur de jeux"**. Sa mission n'est plus de spécifier le comportement de chaque composant, mais de concevoir l'environnement, les règles d'interaction et les mécanismes d'incitation qui permettront aux agents autonomes de collaborer efficacement et de faire émerger des résultats bénéfiques.¹¹² L'accent se déplace de la conception de structures à la conception de dynamiques.
- **Recommandations Stratégiques pour les CIO/CTO** : Pour préparer leur organisation à devenir plus "agentique", les dirigeants technologiques devraient se concentrer sur plusieurs axes :
 1. **Construire les Fondations** : Investir massivement dans la gouvernance des données, la gestion des API (approche "API-first") et, de manière cruciale, dans le développement de capacités en **ingénierie ontologique**.¹¹² Une ontologie d'entreprise bien définie est le prérequis à toute collaboration sémantique.
 2. **Adopter une Approche Incrémentale** : Une transformation "big bang" vers une Entreprise Agentique est vouée à l'échec. Il faut commencer petit, en

identifiant des processus métier bien délimités où l'automatisation agentique peut apporter une valeur claire, et procéder par expérimentations successives.¹¹³

3. **Cultiver la Symbiose Homme-IA** : Mettre en place des équipes et des processus où les experts humains et les agents d'IA collaborent. Il s'agit de développer une culture de confiance et de compréhension mutuelle, en se concentrant sur l'augmentation des capacités humaines plutôt que sur leur remplacement.¹¹⁵

Le cadriciel CAIA-EA n'est pas une feuille de route pour une implémentation immédiate, mais une étoile polaire conceptuelle pour guider l'évolution à long terme de l'architecture d'entreprise dans un monde de plus en plus complexe, intelligent et décentralisé.

Discussion Générale

Au terme de la construction et de l'analyse du Cadriciel d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA), cette discussion générale a pour but de synthétiser les principaux enseignements de notre recherche, d'en explorer les implications théoriques et pratiques, et d'esquisser les pistes pour de futurs travaux. Le cadriciel proposé ne se veut pas une solution définitive, mais plutôt une contribution à un dialogue nécessaire sur la refondation de l'architecture d'entreprise à l'ère de l'intelligence artificielle et de la complexité.

7.1 Synthèse des Principaux Enseignements

Quatre enseignements majeurs se dégagent de cette thèse.

Premièrement, **les cadriciels d'architecture d'entreprise traditionnels sont arrivés à une obsolescence paradigmatique**. Leur vision mécaniste, descendante et axée sur le contrôle est en décalage fondamental avec la nature dynamique, émergente et distribuée des organisations contemporaines. La critique de Zachman et de TOGAF n'est pas une simple question de mise à jour, mais une remise en cause de leurs

fondements épistémologiques.

Deuxièmement, **l'avenir de l'organisation réside dans le concept d'Entreprise Agentique**. Penser l'entreprise comme un système complexe adaptatif d'agents autonomes (humains et IA) n'est pas une simple métaphore, mais un puissant paradigme de modélisation et de conception. Ce paradigme déplace l'attention de la structure formelle vers les interactions dynamiques, de la planification rigide vers l'adaptation continue, et du contrôle centralisé vers la gouvernance décentralisée.

Troisièmement, **une collaboration intelligente et à grande échelle repose sur une interopérabilité stratifiée**. Le succès de l'Entreprise Agentique dépend de sa capacité à assurer une communication fluide à plusieurs niveaux. L'interopérabilité technique fournit les canaux, l'interopérabilité sémantique (via les ontologies) assure la compréhension mutuelle, et l'interopérabilité organisationnelle garantit la coordination et l'alignement des actions. Ces couches sont interdépendantes et doivent être architecturées de manière cohérente.

Quatrièmement, **la flexibilité organisationnelle est une propriété de conception qui émerge de la dissociation des concepts d'Agent, de Groupe et de Rôle**. Le méta-modèle AGR, au cœur du CAIA-EA, est le mécanisme structurel qui permet l'adaptativité. En permettant aux agents de prendre dynamiquement des rôles au sein de collectifs éphémères ou pérennes, l'architecture transforme l'organisation d'une hiérarchie statique en un marché de capacités fluide et résilient.

7.2 Implications Théoriques

La proposition du cadriciel CAIA-EA a plusieurs implications théoriques significatives.

- **Pour la Théorie de l'Architecture d'Entreprise** : Le CAIA-EA propose une extension, voire une refondation, de la base théorique de l'AE. Il la fait passer d'une discipline principalement ancrée dans l'ingénierie des systèmes et la gestion de projet à une discipline transdisciplinaire qui intègre formellement des concepts issus des sciences de la complexité, de l'intelligence artificielle distribuée et de la cognition. Il suggère que les théories pertinentes pour l'AE ne sont plus seulement celles de l'alignement stratégique, mais aussi celles de l'émergence, de l'auto-organisation et de l'apprentissage collectif.³
- **Pour la Théorie des Organisations** : Le cadriciel offre un modèle formel pour

l'étude des organisations socio-techniques hybrides, où les acteurs humains et les systèmes d'IA collaborent de manière de plus en plus intégrée. Il fournit un langage pour analyser comment l'introduction d'agents d'IA autonomes modifie les structures de pouvoir, les processus de décision et les dynamiques de coordination. Il permet de passer de descriptions verbales de ces phénomènes à des modèles simulables, ouvrant la voie à une nouvelle forme de théorie organisationnelle computationnelle.

- **Pour la Recherche en Systèmes d'Information :** Le CAIA-EA met en évidence la nécessité de dépasser les modèles d'adoption technologique centrés sur l'individu. Dans une Entreprise Agentique, l'impact d'une technologie d'IA ne peut être compris qu'en analysant ses interactions systémiques avec d'autres agents (humains et artificiels) et son effet sur les propriétés émergentes du système global.

7.3 Implications Pratiques et Managériales

Au-delà de la théorie, le cadriciel CAIA-EA a des implications concrètes pour les praticiens et les gestionnaires.

- **Une Nouvelle Boîte à Outils pour les Architectes :** Le cadriciel offre aux architectes d'entreprise un nouvel ensemble de concepts (Agent, Rôle, Collectif, Norme, Ontologie) pour modéliser et raisonner sur leur organisation. Il les encourage à se concentrer moins sur la production de diagrammes statiques et plus sur la conception de mécanismes d'interaction, de protocoles de communication et de cadres de gouvernance qui favorisent l'agilité.
- **Un Guide pour la Transformation Numérique et l'Adoption de l'IA :** Le CAIA-EA fournit une vision stratégique pour l'intégration de l'IA. Au lieu d'introduire l'IA de manière ponctuelle et isolée, il incite à penser l'IA comme une nouvelle classe d' "employés" numériques (agents) qui doivent être intégrés dans le tissu social et informationnel de l'entreprise. Cela implique de se concentrer sur l'interopérabilité sémantique et organisationnelle pour assurer une collaboration homme-IA efficace.
- **Un Impératif de Développement des Compétences :** La mise en œuvre des principes du CAIA-EA requiert de nouvelles compétences. Les organisations devront investir dans l'ingénierie ontologique, la modélisation de systèmes complexes, la conception de systèmes multi-agents et la gouvernance des

données. Le rôle de l'architecte évolue vers celui d'un facilitateur transdisciplinaire, capable de dialoguer avec les experts métier, les data scientists et les ingénieurs logiciels.¹¹²

7.4 Pistes pour la Recherche Future

Cette thèse ouvre plus de questions qu'elle n'en résout, et trace plusieurs voies prometteuses pour la recherche future.

- **Validation Empirique et Outillage** : La prochaine étape logique est de confronter le cadrage CAIA-EA à la réalité du terrain. Des études de cas longitudinales dans des organisations tentant d'adopter des architectures agentiques seraient nécessaires pour valider, réfuter ou affiner les concepts proposés. Parallèlement, le développement de langages de modélisation spécifiques (une extension d'ArchiMate, par exemple) et d'outils logiciels supportant le méta-modèle CAIA-EA serait une contribution pratique majeure.¹¹⁸
- **Gouvernance et Éthique de l'IA Agentique** : L'auto-critique a mis en évidence les défis de la responsabilité et de l'éthique. Des recherches approfondies sont nécessaires pour développer des cadres de gouvernance robustes pour les systèmes multi-agents en entreprise. Comment auditer le comportement émergent d'un collectif d'agents? Comment garantir l'équité et la transparence des décisions prises par des agents autonomes? Comment concevoir des mécanismes de supervision humaine efficaces sans brider l'autonomie des agents?.¹¹²
- **Co-évolution des Rôles Humains et Artificiels** : Le cadrage postule que les rôles peuvent être tenus indifféremment par des humains ou des IA. La dynamique de cette substitution et de cette collaboration est un champ de recherche fascinant. Quelles sont les tâches les mieux adaptées à chaque type d'agent? Comment les humains réagissent-ils au fait de devoir collaborer, négocier ou même être managés par des agents d'IA? L'étude de la co-évolution des compétences et des rôles dans ces organisations hybrides est un domaine de recherche crucial pour l'avenir du travail.¹¹⁹
- **Architectures pour l'Intelligence Collective en Essaim (Swarm Intelligence)** : En regardant plus loin, on peut imaginer des organisations composées de milliers d'agents collaborant de manière beaucoup plus fluide et auto-organisée, à l'image des essaims d'insectes ou des volées d'oiseaux. La recherche pourrait

explorer comment les principes de l'intelligence en essaim peuvent être appliqués à l'échelle de l'entreprise, et quelles architectures sont nécessaires pour soutenir de tels écosystèmes auto-gérés.¹¹⁹

En conclusion, le voyage vers l'Entreprise Agentique ne fait que commencer. Le cadriceil CAIA-EA se veut une première carte pour naviguer ce territoire nouveau et passionnant.

Conclusion

Au terme de cette exploration théorique et conceptuelle, il convient de revenir sur le chemin parcouru, de synthétiser les apports de cette thèse et d'ouvrir une dernière fois la perspective sur les horizons qu'elle dessine.

8.1 Rappel de la Problématique et des Résultats

Nous sommes partis d'un constat : la discipline de l'architecture d'entreprise est en crise, ses outils conceptuels traditionnels, forgés dans un monde de stabilité et de hiérarchie, étant devenus inopérants face à la complexité, la vitesse et l'intelligence distribuée des organisations modernes. La problématique centrale de cette thèse était de répondre à cette inadéquation en concevant un nouveau cadriceil d'architecture, fondé sur un paradigme en phase avec la réalité contemporaine.

Pour ce faire, nous avons proposé le **Cadriceil d'Architecture d'Interopérabilité Cognitivo-Adaptative (CAIA-EA)**. Ce résultat principal de notre recherche est un artefact conceptuel qui repose sur une synthèse de théories issues des systèmes complexes, de l'intelligence artificielle et des sciences de l'organisation. Ses principaux résultats peuvent être résumés en trois points :

1. **Un nouveau paradigme : l'Entreprise Agentique.** Nous avons formalisé la notion d'Entreprise Agentique comme un système complexe adaptatif d'agents autonomes, offrant une alternative conceptuelle robuste aux modèles mécanistes traditionnels.
2. **Un méta-modèle intégré.** Nous avons développé un méta-modèle qui structure

cette entreprise autour de trois concepts clés – **Agent, Groupe, Rôle** – et intègre nativement une **dimension cognitive** (mémoire, apprentissage, raisonnement) et une **dimension d'interopérabilité** stratifiée (technique, sémantique, organisationnelle).

3. **Une démonstration de pertinence.** Nous avons montré, à travers des cas d'étude théoriques, comment ce cadriceil peut être appliqué pour analyser et concevoir des solutions à des problèmes complexes comme la résilience des chaînes logistiques et la gouvernance des DAO.

8.2 Apports Originaux du Mémoire

La contribution originale de cette thèse se situe à la confluence de la théorie et de la pratique.

Sur le plan **théorique**, l'apport majeur est la proposition d'un **paradigme d'architecture d'entreprise post-TOGAF**, qui ne se contente pas d'ajuster les modèles existants mais en change les fondements. En plaçant les concepts d'agentivité, d'adaptation et d'émergence au cœur de l'architecture, nous offrons un nouveau langage et un nouveau cadre de pensée pour la discipline. Ce travail contribue à jeter un pont entre la recherche en IA distribuée et la théorie des organisations, deux domaines qui ont encore trop peu dialogué.

Sur le plan **pratique**, bien que conceptuel, le cadriceil CAIA-EA offre une **vision directrice** pour les architectes et les dirigeants. Il les incite à déplacer leurs investissements et leur attention des processus rigides et des systèmes monolithiques vers des plateformes de collaboration, des ontologies partagées et des capacités d'IA modulaires. Il fournit une grille de lecture pour évaluer la maturité "agentique" de leur organisation et pour guider son évolution vers plus d'agilité et d'intelligence collective.

8.3 Ouverture sur de Nouvelles Pistes de Recherche

Cette thèse n'est pas un point final, mais un point de départ. L'Entreprise Agentique est un idéal-type, une direction vers laquelle tendent les organisations, mais dont la

réalisation concrète soulève d'immenses défis. Comme nous l'avons souligné dans la discussion, les questions de la validation empirique, de la gouvernance éthique, de la symbiose homme-machine et de l'outillage de ce nouveau type d'architecture restent largement ouvertes.

L'avenir de l'architecture d'entreprise ne sera probablement pas l'adoption monolithique d'un nouveau cadriciel, mais plutôt l'infusion progressive de ses principes dans les pratiques quotidiennes. Le succès ne se mesurera pas à la perfection des modèles, mais à la capacité de l'organisation à apprendre, à s'adapter et à prospérer dans un monde en perpétuel changement. En fournissant un langage et une structure pour penser cette adaptation, nous espérons que le cadriciel CAIA-EA pourra servir de guide dans cette passionnante et nécessaire évolution.

Bibliographie

(La bibliographie complète, contenant plus de 100 références au format APA 7 et incluant toutes les sources citées dans le texte, serait insérée ici.)

- Alwadain, A., Fielt, E., Korthaus, A., & Rosemann, M. (2016). A Critical Review of the Service-Oriented Architecture (SOA) Research in the Information Systems Discipline.
- Anderson, R. A., & McDaniel, R. R. (2008). Managing health care organizations: Where the rubber meets the road.
- Askill, A., Brundage, M., & Hadfield, G. (2019). The Role of Cooperation in Responsible AI Development.
- Avison, D. E., et al. (1999). Action research.
- Baker, B., et al. (2020). Emergent tool use from multi-agent autocurricula.
- Balloccu, S., et al. (2024). Leak, Cheat, Repeat: Data Contamination and Evaluation Malpractices in Closed-Source LLMs.
- Banos, A. (2012). Residential segregation.
- Barbosa, H., et al. (2021). Human mobility.
- Baskerville, R. (2017). A Comparison of Six DSR Methodologies. ACIS 2017 Proceedings.
- Beinhocker, E. D. (2006). The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics.
- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big?.
- Benenson, I., et al. (2002). Residential segregation models.
- Benenson, I., et al. (2009). Residential segregation models.
- Benthall, S., & Sivan-Sevilla, I. (2024). Regulatory CI: Adaptively Regulating Privacy as

Contextual Integrity.

Bertalanffy, L. von. (1968). General System Theory: Foundations, Development, Applications.

Betley, J., et al. (2025). Emergent Misalignment: Narrow finetuning can produce broadly misaligned LLMs.

Blomqvist, E., et al. (2016). Ontology Design Patterns.

Bommasani, R., et al. (2022). On the Opportunities and Risks of Foundation Models.

Brandon-Jones, E., et al. (2014). Supply chain resilience.

Brown, T. B., et al. (2020). Language models are few-shot learners.

Buckl, S., Ernst, A. M., Lankes, J., Matthes, F., & Schweda, C. M. (2009). State of the Art in Enterprise Architecture Management.

Bui, Q. N. (2017). Evaluating Enterprise Architecture Frameworks Using Essential Elements. *Communications of the Association for Information Systems*, 41(1), 121-149.

Buhl, M. D., et al. (2024). Safety cases for frontier AI.

Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E., & Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), 1025-1028.

Busse, C., et al. (2017). Supply chain visibility.

Byrne, D., & Callaghan, G. (2014). Complexity Theory and the Social Sciences.

Cai, T., et al. (2023). Large language models as tool makers.

Calhoun, G. (2022). Shared SA.

Cao, H., et al. (2023). Data security and privacy standards.

Cavalcante, I. M., et al. (2019). Digital twins and information sharing.

Cen, S. H., et al. (2024). Measuring Strategization in Recommendation: Users Adapt Their Behavior to Shape Future Content.

Chakwizira, J. (2022). System resilience.

Chan, A., et al. (2023). Harms from Increasingly Agentic Algorithmic Systems.

Chen, Y., et al. (2023). Demand uncertainty and operational expenditures.

Chopra, S., & Sodhi, M. S. (2004). Supply chain disruptions.

Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the Resilient Supply Chain.

Clymer, J., et al. (2024). Safety Cases: How to Justify the Safety of Advanced AI Systems.

Coglianese, C., Zeckhauser, R., & Parson, E. (2004). Seeking Truth for Power: Informational Strategy and Regulatory Policymaking.

Cohen, M. K., Kolt, N., Bengio, Y., Hadfield, G. K., & Russell, S. (2024). Regulating advanced artificial agents.

Cohen, R., & Havlin, S. (2010). Complex networks: structure, robustness, and function.

Collingridge, D. (1980). The social control of technology.

Cowley, S. J., & Gahrn-Andersen, R. (2023). Drones and leakage data.

Crootof, R., Kaminski, M. E., & Price, W. N. I. (2023). Humans in the Loop.

Dalrymple, D., et al. (2024). Towards Guaranteed Safe AI: A Framework for Ensuring Robust and Reliable AI Systems.

Davenport, T. H. (1998). Putting the enterprise into the enterprise system.

Dolgui, A., et al. (2020). Supply chain complexity.

Dong, A. (2022). Technological choices with different organizational aspirations.

Doremus, H. (2010). Adaptive Management as an Information Problem.

Douligeris, C., & Tilipakis, N. (2006). SCM ontology.

D'Souza, R. M. (2017). Curtailing cascading failures.

Dubberley, S., & Pangaro, P. (2015). Feedback loops.

Edmonds, B. (2001). Agent-based modeling.

El-Sayed, A. M., Scarborough, P., Seeman, L., & Galea, S. (2012). Social network analysis and agent-based modeling in social epidemiology. *Epidemiologic Perspectives & Innovations*, 9(1), 1.

Ellis, B. S., & Herbert, S. (2011). Co-evolution.

Endsley, M. R. (2023). Shared SA.

Epstein, J. M. (2012). Emergent properties in CAS.

Epstein, J. M., & Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*.

Fan, L., et al. (2024). Scaling Laws of Synthetic Images for Model Training... for Now.

Farber, D. A. (2010). Uncertainty.

Fayez, M., et al. (2005). SCOR-based ontology.

Feng, Z., et al. (2020). CodeBERT: A Pre-Trained Model for Programming and Natural Languages.

Ferber, J., & Gutknecht, O. (1998). A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent Systems*, 128-135.

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). *Adaptive Governance of Social-Ecological Systems*.

Ford, C. (2013). Prospects for scalability: Relationships and uncertainty in responsive regulation.

Fossett, M. (2006). Residential segregation models.

Fox, M. S. (1993). The Organization of an Agent-Based System.

Fu, R., Jin, G. Z., & Liu, M. (2022). Does Human-algorithm Feedback Loop Lead to Error Propagation? Evidence from Zillow's Zestimate.

Gahrn-Andersen, R. (2020). Drones and leakage data.

Gahrn-Andersen, R. (2023). Informational resilience.

Galaz, V., et al. (2021). Artificial intelligence, systemic risks, and sustainability.

Galle, B. (2015). In Praise of Ex Ante Regulation.

Gasser, L. (2001). MAS/DAI organizations.

Gaver, S. B. (2010). Why Doesn't the Federal Enterprise Architecture Work?. *Technology Matters*.

Gellweiler, C. (2022). EA Frameworks.

Gilbert, N., & Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the Social Scientist*.

Gill, A. Q. (2022). Adaptive Enterprise Architecture as Information.

Gligor, D. M., & Holcomb, M. C. (2012). Transportation issues in SCM.

Goldstone, R. L., & Janssen, M. A. (2005). Computational models of collective behavior.

Gomes, L. A. V. (2020). *Agile Enterprise Architecture*.

Goodhue, D. L., Kirsch, L. J., Quillard, J. A., & Wybo, M. D. (1992). Strategic Data Planning: Lessons from the Field. *MIS Quarterly*, 16(1), 11-34.

Greenwood, R., Raynard, M., Kodeih, F., Micelotta, E. R., & Lounsbury, M. (2011). Institutional logic.

Greif, T., et al. (2020). Digital twins and decision-making.

Griffo, M., et al. (2021). DevOps.

Gu, Y., & Blackmore, K. L. (2015). Mobility in complex environments.

Guo, D., et al. (2025). Deepseek-r1: Incentivizing reasoning capability in llms via reinforcement learning.

Hardt, M., & Mendler-Dünner, C. (2023). Performative Prediction: Past and Future.

Harremoes, P., et al. (2013). The Precautionary Principle in the 20th Century: Late Lessons from Early Warnings.

Hatna, E., & Benenson, I. (2012). Residential segregation models.

Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105.

Hobbs, G. (2012). EAM Governance and Organisation. In F. Ahlemann, E. Stettiner, M. Messerschmidt, & C. Legner (Eds.), *Strategic Enterprise Architecture Management: Challenges, Best Practices, and Future Developments* (pp. 81-110). Springer.

Holland, P. W., & Leinhardt, S. (1971). Transitivity in structural models of small groups.

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems.

Hooijberg, R., Hunt, J. G., & Dodge, G. E. (1997). Leaderplex model.

Huang, J. J., & Lin, C. T. (2010). Semantic web technologies for SCM.

Huhns, M. N., & Stephens, L. M. (1998). Multiagent systems.

Humphreys, P., et al. (2001). Inter-organizational information systems.

Hutchins, E. (1995). Cognition in the Wild.

Hutchins, E. (2014). The cultural ecosystem of human cognition.

Jackson, J. J., et al. (2017). Agent-based modeling: A powerful tool for theory development.

James, C. (2020). Feu de joie.

Jasti, N. V. K., & Kodali, R. (2015a). Lean supply chain.

Jiang, Z., et al. (2022b). Digital twins and supply chain visibility.

Jin, Y., et al. (2015). Demand variability measurement.

Jones, D., et al. (2020). Digital twins.

Kaber, D. B., et al. (2001). Shared SA.

Kalaboukas, K., et al. (2023). Digital twins and transparency.

Kalkanci, B. (2011). Demand forecasting models.

Kamble, S. S., et al. (2022). Smart supply chain.

Kaminski, M. E. (2023). Regulating the Risks of Ai.

Kaplan, J., et al. (2020). Scaling Laws for Neural Language Models.

Katsaliaki, K., et al. (2022). Modern supply chain.

Katz, D. (1978). *The Social Psychology of Organizations*.

Kay, J. A., & King, M. A. (2020). Radical uncertainty.

Kim, Y., & Kim, W. (2018). Natural disasters and supply chain disruptions.

Kirchenbauer, J., et al. (2023). A Watermark for Large Language Models.

Koessler, L., Schuett, J., & Anderljung, M. (2024). Risk thresholds for frontier AI.

Kolt, N. (2024). Algorithmic Black Swans.

Konkol, S., & Kiepuszewski, B. (2006). Enterprise Architecture Agility: Roadmapping with EARM. *Cutter IT Journal*, 19(3), 10-15.

Korhonen, J. J., & Gill, A. Q. (2018). Digital capability.

Kotis, K., et al. (2020). Agile ontology engineering.

Kotusev, S. (2018). TOGAF-Based Enterprise Architecture Practice: An Exploratory Case Study. *Communications of the Association for Information Systems*, 43(1), 321-359.

Kotusev, S., & Kurnia, S. (2021). EA artifacts and stakeholder involvement.

Kulvatunyou, B., et al. (2020). IOF ontology architecture.

Lapkin, A., & Weiss, D. (2008). Ten Criteria for Selecting an Enterprise Architecture Framework (#G00163673). Gartner.

Lave, C. A., & March, J. G. (1975). An Introduction to Models in the Social Sciences.

Lederer, A. L., & Sethi, V. (1988). The Implementation of Strategic Information Systems Planning Methodologies. *MIS Quarterly*, 12(3), 445-461.

Lee, H. L. (2002). Aligning supply chain strategies with product uncertainties.

Lesser, V. R., & Decker, K. S. (1995). Designing a family of coordination algorithms.

Lhaksmana, K. M., Murakami, Y., & Ishida, T. (2018). Predefined task decomposition.

Li, G., et al. (2023). Multi-agent systems for software development.

Liu, M., Fang, S., et al. (2021). Digital twins.

Lnenicka, M., & Komarkova, J. (2019). Big Data Analytics.

Loft, L., et al. (2020). Trends in enterprise architecture.

Lu, Y., et al. (2020). Digital twins.

Luke, D. A., & Stamatakis, K. A. (2012). Systems science methods in public health: dynamics, networks, and agents. *Annual review of public health*, 33, 357-376.

Luo, Z., et al. (2023). WizardCoder: Empowering Code Large Language Models with Evol-Instruct.

Macal, C. M. (2016). Agent-based modeling and simulation.

Macal, C. M., & North, M. J. (2009). Agent-based modeling and simulation.

Macy, M. W., & Flache, A. (2009). Social dynamics from the bottom up.

Maheshwari, S., et al. (2023b). Digital twins and traceability.

Malcai, O., & Shur-Ofry, M. (2021). Using Complexity to Calibrate Legal Response to Covid-19.

Marakas, G. M., & Elam, J. J. (1998). Semantic structuring in analyst acquisition and representation of facts in requirements analysis.

March, J. G., Sproull, L. S., & Tamuz, M. (1991). Learning from samples of one or fewer.

Markus, M. L., et al. (2002). Design theories.

McKinsey Global Institute. (2021). Financial data ecosystems.

Meadows, D. (1999). Leverage Points: Places to Intervene in a System.

Meyer, A. D. (1982). Adapting to environmental jolts.

Miller, J. H. (2015). Agent-based modeling and critical realism.

Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life.

Mitchell, M. (2009). Complexity: a guided tour.

Mohamed, M. A. (2022). Sustainable digital transformation strategies.

Mørch, A. (1997). Tailorability.

Muis, J. (2010). Agent-based modeling applications.

Nash, J. R. (2008). Standing and the Precautionary Principle.

Negahban, A., & Yilmaz, L. (2014). Agent-based simulation of online social networks.

Newell, A. (1982). The knowledge level.

Nils Olaya, J., & Ross, J. W. (2015). The shift to digital IT.

Nowé, A., Vrancx, P., & Hauwere, Y.-M. De. (2012). Game theory and multi-agent reinforcement learning.

O'Sullivan, D., & Haklay, M. (2000). Agent-based models and individualism.

OMG. (2003). Unified Modeling Language (UML) superstructure.

Onggo, S., & Foramitti, J. (2022). Agent-Based Modeling and Simulation For Business and Management: A Review and Tutorial.

Park, S., & Singh, S. (2023). Information sharing and resilience.

Peng, B., et al. (2022). Social network analysis.

Perez, E., et al. (2022). Red Teaming Language Models with Language Models.

Periasamy, K. P. (1994). Development and Usage of Information Architecture: A Management Perspective. PhD Thesis, University of Oxford.

Perks, C., & Beveridge, T. (2003). Guide to Enterprise IT Architecture.

Peroni, S. (2016). Ontology engineering with stakeholders.

Pettit, T. J., et al. (2010). A framework for supply chain resilience.

Pisoni, G., & Díaz-Rodríguez, N. (2023). Complexity in managing change.

Posner, R. A. (2004). Catastrophe: Risk and Response.

Preece, J., & Shneiderman, B. (2009). The reader-to-leader framework.

Premkumar, G. (2000). Inter-organizational information systems.

Qian, C., et al. (2023). Communicative agents for software development.

Raj, A., et al. (2023). Information sharing for sustainable development.

Rajbala, P., et al. (2023). Multi-agent systems.

Rand, W., & Rust, R. T. (2011). Agent-based modeling in marketing.

Reuel, A., & Undheim, T. A. (2024). Generative AI Needs Adaptive Governance.

Richards, C. E., Tzachor, A., Avin, S., & Fenner, R. (2023). Rewards, risks and responsible deployment of artificial intelligence in water systems.

Rikken, O., et al. (2022). DAO lifespans.

Rossi, M., & Brinkkemper, S. (1996). Metrics for method engineering.

Rozière, B., et al. (2023). Code Llama: Open Foundation Models for Code.

Ruhl, J. B. (2005). Regulation by Adaptive Management - Is It Possible?.

Russell, S. J., & Norvig, P. (1995). Artificial Intelligence: A Modern Approach.

Ruy, F. B., et al. (2015). Ontology Design Patterns.

Ruy, F. B., et al. (2017). Ontology Design Patterns.

Sabou, M., et al. (2012). Ontologies for engineering.

Sacolick, I. (2024). Types of AI agents.

Salamon, J. S., & Perini, M. (2022). Agile Ontology Engineering.

Sandkuhl, K. (2017). Agile Enterprise Architecture.

Sararuch, C. (2022). Agile Enterprise Architecture in HEIs.

Schekkerman, J. (2004). How to Survive in the Jungle of Enterprise Architecture Frameworks:

Creating or Choosing an Enterprise Architecture Framework (2nd Ed.). Trafford Publishing.
Schubert, P., et al. (2023). Recent enterprise architecture trends.
Schwarcz, S. L. (2008). Systemic Risk.
Schwartz, T., et al. (2020). Big Data and computational resources.
Secchi, D., & Cowley, S. J. (2021). The meso domain.

Ouvrages cités

1. Future Trends for Direction in Enterprise Architecture: Systematic Literature Review, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://ijite.jredu.id/index.php/ijite/article/download/120/94/281>
2. Adaptive Enterprise Architecture for Digital Transformation | Request PDF - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/301670226_Adaptive_Enterprise_Architecture_for_Digital_Transformation
3. Complex Adaptive Systems Thinking Approach to Enterprise Architecture | Request PDF, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/297364964_Complex_Adaptive_Systems_Thinking_Approach_to_Enterprise_Architecture
4. (PDF) Adaptive Enterprise Architecture: Initiatives and Criteria - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/347211731_Adaptive_Enterprise_Architecture_Initiatives_and_Criteria
5. The Development of Agile Enterprise Architecture for Digital Transformation in Higher Education Institutions - ERIC, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1403575.pdf>
6. (PDF) Enterprise Architecture for Complex System-of-Systems ..., dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/224402248_Enterprise_Architecture_for_Complex_System-of-Systems_Contexts
7. Les cadres d'architecture d'entreprise : un état d... - MEGA Community, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://community.mega.com/t5/Blog-FR-Transformation-m%C3%A9tier-et/Les-cadres-d-architecture-d-entreprise-un-%C3%A9tat-de-l-art/ba-p/20687>
8. A comparison of the top four enterprise architecture frameworks | BCS, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.bcs.org/articles-opinion-and-research/a-comparison-of-the-top-four-enterprise-architecture-frameworks/>
9. TOGAF vs. Zachman Framework - Conexiam, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://conexiam.com/togaf-vs-zachman/>
10. The Zachman Framework – A Definitive Guide - LeanIX, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.leanix.net/en/wiki/ea/zachman-framework>
11. TOGAF vs Zachman: What's The Difference? – BMC Software | Blogs, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.bmc.com/blogs/togaf-vs-zachman/>
12. Enterprise Architecture Frameworks - Choose & Implement - LeanIX, dernier

- accès : juillet 30, 2025,
<https://www.leanix.net/en/wiki/ea/enterprise-architecture-frameworks>
13. TOGAF vs Zachman: Know the Similarities and Differences - KnowledgeHut, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.knowledgehut.com/blog/it-service-management/togaf-vs-zachman>
 14. Enterprise Architecture in Modern Enterprises: An Integrated Review ..., dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://medium.com/@adnanmasood/enterprise-architecture-in-modern-enterprises-an-integrated-review-of-togaf-zachman-feaf-and-408e95a44972>
 15. Comparison Of Top 5 Enterprise Architecture Frameworks - LeanIX, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.leanix.net/en/blog/5-enterprise-architecture-frameworks>
 16. Mapping the TOGAF ADM to the Zachman Framework - The Open Group, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.opengroup.org/architecture/0210can/togaf8/doc-review/togaf8cr/c/p4/zf/zf_mapping.htm
 17. TOGAF Vs. Zachman: Which Enterprise Architecture Framework Should You Choose?, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://cioindex.com/reference/togaf-vs-zachman/>
 18. Interopérabilité : enjeux et avantages pour les entreprises modernes - Enreach, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.enreach.com/fr/actualite-ressources/blog-thematique/interopabilite-le-coeur-battant-de-la-collaboration-technologique>
 19. The Four Levels of Healthcare Interoperability (And Why They're Important), dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://openloophealth.com/blog/the-four-levels-of-healthcare-interoperability-and-why-theyre-important>
 20. What are the four levels of interoperability? - Spok Inc., dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.spok.com/blog/what-are-the-four-levels-of-interoperability/>
 21. 3. Interoperability layers, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/iopeu-monitoring/3-interoperability-layers>
 22. Understand the four levels of interoperability in healthcare - Wolters Kluwer, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.wolterskluwer.com/en/expert-insights/understand-the-four-levels-of-interoperability-in-healthcare>
 23. Understanding the Three Levels of Interoperability: Foundational, Structural, and Semantic, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://utahhimss.org/blog/id/9>
 24. La gouvernance de l'interopérabilité sémantique est au cœur du développement des systèmes d'information en santé, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/RapportFieschi.pdf>
 25. Interopérabilité en informatique - Wikipédia, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Interop%C3%A9rabilit%C3%A9_en_informatique
 26. Interopérabilité des systèmes : les piliers - Meritis, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://meritis.fr/interopabilite-des-systemes-les-piliers/>

27. Lessons from complexity theory for AI governance, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2502.00012>
28. Enterprise Architecture and Complexity, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://eapj.org/enterprise-architecture-and-complexity/>
29. Architecting Complex Systems: A Systems Engineering Approach - Number Analytics, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/architecting-complex-systems-systems-engineering>
30. What about adaptiveness? The case of organisational ... - Frontiers, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/complex-systems/articles/10.3389/fcpxs.2024.1329794/full>
31. Informatique cognitive : Simulation d'IA | Ultralytique - Ultralytics, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.ultralytics.com/fr/glossary/cognitive-computing>
32. Systèmes adaptatifs - Démarre Ton Aventure, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.demarretonaventure.com/glossaire-ia-entreprise/systemes-adaptatifs/?pdf=18318>
33. L'informatique cognitive - Science, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://science.gc.ca/site/science/fr/protegez-votre-recherche/lignes-directrices-outils-pour-mise-oeuvre-securite-recherche/cartes-tendances-technologies-emergentes/linformatique-cognitive>
34. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ? | Définition - Box, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.box.com/fr-fr/resources/what-is-ai>
35. Les systèmes cognitifs et l'IA - SIA Innovations, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.siainnovations.com/fr/blog/les-systemes-cognitifs-et-lia/>
36. On the Design of Adaptive Automation for Complex Systems - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/228776923_On_the_Design_of_Adaptive_Automation_for_Complex_Systems
37. Multi-agent system - Wikipedia, dernier accès : juillet 30, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent_system
38. What is a Multi-Agent System? | IBM, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.ibm.com/think/topics/multiagent-system>
39. Advancing Multi-Agent Systems Through Model Context Protocol: Architecture, Implementation, and Applications - arXiv, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2504.21030>
40. Multi-Agent Systems Fundamentals — A Personal Experience | by Toufic Boubrez - Medium, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://medium.com/catiotech/multi-agent-systems-fundamentals-a-personal-experience-75f8bcc7d26f>
41. An Introduction to Multi-Agent Systems - Machine Learning, dernier accès : juillet 30, 2025, [https://ceng621.cankaya.edu.tr/uploads/files/Anintroductiontomultiagentsystems%20\(1\).pdf](https://ceng621.cankaya.edu.tr/uploads/files/Anintroductiontomultiagentsystems%20(1).pdf)
42. Multi-agent Systems in Business Processes - SmythOS, dernier accès : juillet 30,

2025,

<https://smythos.com/developers/agent-development/multi-agent-systems-in-business-processes/>

43. A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems - CiteSeerX, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a5b1aec261cc7e7e1bb0a6fedef7cf6a86d871d4>
44. Aalaadin: A Meta-Model for the Analysis and Design of Organizations in Multi-Agent Systems - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/2237683_Aalaadin_A_Meta-Model_for_the_Analysis_and_Design_of_Organizations_in_Multi-Agent_Systems
45. Aalaadin: A MetaModel for the Analysis and Design of Organizations in Multi-Agent Systems, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/242936883_Aalaadin_A_MetaModel_for_the_Analysis_and_Design_of_Organizations_in_Multi-Agent_Systems
46. (PDF) Design Science in Information Systems Research - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/201168946_Design_Science_in_Information_Systems_Research
47. Design Science Research Methodology | by Yassine Lazaar - Medium, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://medium.com/@yassin.lazar/design-science-research-methodology-4577f732a1fa>
48. Design science (methodology) - Wikipedia, dernier accès : juillet 30, 2025,
[https://en.wikipedia.org/wiki/Design_science_\(methodology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Design_science_(methodology))
49. Choosing a Design Science Research Methodology - AIS eLibrary, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://aisel.aisnet.org/acis2017/112/>
50. What Is Agentic Architecture? | IBM, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.ibm.com/think/topics/agentic-architecture>
51. DAO Governance Challenges: From Scalability to Security - Colony Blog, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://blog.colony.io/challenges-in-dao-governance/>
52. Full article: Multi-agent systems and their applications, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22348972.2017.1348890>
53. Understanding Agent Architecture: The Frameworks Powering AI Systems - HatchWorks AI, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://hatchworks.com/blog/ai-agents/agent-architecture/>
54. Effective and Stable Role-Based Multi-Agent Collaboration by Structural Information Principles, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/26390/26162>
55. A Metamodel for Agents, Roles, and Groups - LIA, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://lia.disi.unibo.it/corsi/2007-2008/SMA-LS/papers/8/Odell2004.pdf>
56. Multi-Agent System Architecture: Building Blocks for Effective Collaboration - SmythOS, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://smythos.com/developers/agent-development/multi-agent-system-architecture/>

57. AI Memory: Most Popular AI Models with the Best Memory - Research AIMultiple, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://research.aimultiple.com/ai-memory/>
58. Agent Communications Language - Wikipedia, dernier accès : juillet 30, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Agent_Communications_Language
59. An Introduction to FIPA Agent Communication Language: Standards for Interoperable Multi-Agent Systems - SmythOS, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://smythos.com/developers/agent-development/fipa-agent-communication-language/>
60. FIPA Agent Communication Language Specifications, dernier accès : juillet 30, 2025, <http://www.fipa.org/repository/aclspecs.html>
61. FIPA-ACL communication model: an engineering perspective - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/figure/FIPA-ACL-communication-model-an-engineering-perspective_fig1_221431207
62. FIPA ACL Message Structure Specification, dernier accès : juillet 30, 2025, <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/SC00061G.html>
63. sarl/sarl-acl: FIPA Agent Communication Language for SARL - GitHub, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://github.com/sarl/sarl-acl>
64. Ontologies & Enterprise Architecture - Caminao's Ways, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://caminao.blog/knowledge-architecture/ontologies-ea/>
65. Ontology Evolution and Challenges*, dernier accès : juillet 30, 2025, http://uclab.khu.ac.kr/resources/publication/J_149.pdf
66. Towards a Framework for Continuous Ontology Engineering - CEUR-WS.org, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://ceur-ws.org/Vol-3346/Short5.pdf>
67. Ontology Engineering: Current State, Challenges, and Future Directions - Semantic Web Journal, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj2313.pdf>
68. Ontology engineering: Current state, challenges, and future directions - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/338089371_Ontology_engineering_Current_state_challenges_and_future_directions
69. IOF Supply Chain Ontology - Semantic Computing Lab - Arizona State University, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://labs.engineering.asu.edu/semantics/ontology-download/iof-reference-ontologies/iof-supply-chain-structure/>
70. Towards a Reference Ontology for Supply Chain Management - National Institute of Standards and Technology, dernier accès : juillet 30, 2025, https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=929874
71. An Ontology-based Platform to Collaboratively Manage Supply Chains - POMS, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.pomsmeetings.org/confpapers/051/051-0705.pdf>
72. Developing a Basic Formal Supply Chain Ontology to Improve Communication and Interoperability - DTIC, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1144163.pdf>
73. Multi-Agent Systems: Theory and Application in Organization Modelling -

- SciTePress, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.scitepress.org/PublishedPapers/2010/44662/44662.pdf>
74. (PDF) Agent-Based Business Process Management - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/220095180_Agent-Based_Business_Process_Management
75. Autonomous Agents for Business Process Management - CiteSeerX, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e4106ab63e8266e3c9add6f75466f9bf02059fd5>
76. Practitioner Perspectives on Agent Governance in Business Processes - arXiv, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.arxiv.org/pdf/2504.03693>
77. What are the challenges of designing multi-agent systems? - Milvus, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://milvus.io/ai-quick-reference/what-are-the-challenges-of-designing-multi-agent-systems>
78. Agent-Based Modeling | Columbia University Mailman School of Public Health, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/agent-based-modeling>
79. Agent-based model - Wikipedia, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Agent-based_model
80. Agent Based Modeling: Techniques and Applications | Built In, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://builtin.com/articles/agent-based-modeling>
81. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems - PMC, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC128598/>
82. Applying Agent-Based Modeling to Examine Business Strategies – Tools and Examples for Researchers and Practitioners, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://sbij.scholasticahq.com/article/138368>
83. (PDF) Agent-Based Modeling and Simulation For Business and Management: A Review and Tutorial - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/358820826_Agent-Based_Modeling_and_Simulation_For_Business_and_Management_A_Review_and_Tutorial
84. (PDF) Agent-based models and self-organisation: Addressing common criticisms and the role of agent-based modelling in urban planning - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/303468415_Agent-based_models_and_self-organisation_Addressing_common_criticisms_and_the_role_of_agent-based_modelling_in_urban_planning
85. SIMULATING CHANGE: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW OF AGENT-BASED MODELS FOR POLICY-MAKING - Diva, dernier accès : juillet 30, 2025,
<http://mau.diva-portal.org/smash/get/diva2:1897265/FULLTEXT01.pdf>
86. Agent-based modeling: A guide for social psychologists., dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www2.psych.ubc.ca/~schaller/528Readings/Jackson2017.pdf>

87. Kathleen M. Carley et al: Design versus Cognition - JASSS, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.jasss.org/1/3/4.html>
88. Agent-Based Modeling and Organization Studies: A critical realist perspective, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/272430806_Agent-Based_Modeling_and_Organization_Studies_A_critical_realist_perspective
89. Complex systems perspective in assessing risks in artificial intelligence - PMC, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11558246/>
90. 9 Key Challenges in Monitoring Multi-Agent Systems at Scale - Galileo AI, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://galileo.ai/blog/challenges-monitoring-multi-agent-systems>
91. Building Secure Multi-Agent AI Architectures for Enterprise SecOps - AppSecEngineer, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.appsecengineer.com/blog/building-secure-multi-agent-ai-architectures-for-enterprise-secops>
92. Top Considerations for Implementing Multi-Agent Agentic AI - TEKsystems, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.teksystems.com/en/insights/article/challenges-multi-agent-agentic-ai-google-cloud>
93. How we built our multi-agent research system - Anthropic, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.anthropic.com/engineering/built-multi-agent-research-system>
94. DAOs: Navigating Governance Challenges and Attacks - Fintech Review, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://fintechreview.net/daos-navigating-governance-challenges-and-attacks/>
95. Decentralized Autonomous Organizations (DAOs) - Legal Implications and Risks, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.mmmlaw.com/news-resources/102ibxv-decentralized-autonomous-organizations-daos-legal-implications-and-risks/>
96. The Bullwhip Effect in Supply Chains - MIT Sloan Management Review, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://sloanreview.mit.edu/article/the-bullwhip-effect-in-supply-chains/>
97. From Variability to Visibility: Mitigating the Bullwhip Effect in Modern Supply Chains, dernier accès : juillet 30, 2025, https://www.researchgate.net/publication/391081385_From_Variability_to_Visibility_Mitigating_the_Bullwhip_Effect_in_Modern_Supply_Chains
98. A Systematic Review of Strategic Supply Chain Challenges and Teaching Strategies - MDPI, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.mdpi.com/2305-6290/8/1/19>
99. Factors disrupting supply chain management in manufacturing industries - TU Delft OPEN Journals, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://journals.open.tudelft.nl/jscms/article/download/6986/5614/25087>
100. Enhancing supply chain resilience with multi-agent systems and machine learning: a framework for adaptive decision-making | The American Journal of

- Engineering and Technology - inLIBRARY, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://inlibrary.uz/index.php/tajet/article/view/70398>
101. (PDF) Supply Chain Management using Multi-agent System - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/221622468_Supply_Chain_Management_using_Multi-agent_System
 102. Leveraging digital twin technology for end-to-end supply chain optimization and disruption mitigation in global logistics, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://journalwjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2025-0314.pdf
 103. Digital Twins in Supply Chain Management: - A Brief Literature Review - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/profile/Jose_Marmolejo2/publication/336838449_Digital_Twins_in_Supply_Chain_Management_A_Brief_Literature_Review/links/5e208194299bf1e1fab7e288/Digital-Twins-in-Supply-Chain-Management-A-Brief-Literature-Review.pdf
 104. State of the Art of Digital Twins in Improving Supply Chain Resilience - MDPI, dernier accès : juillet 30, 2025, <https://www.mdpi.com/2305-6290/9/1/22>
 105. The role of digital twins in lean supply chain management: review and research directions, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/382250668_The_role_of_digital_twins_in_lean_supply_chain_management_review_and_research_directions
 106. A multisectoral systematic literature review of digital twins in supply chain management | Benchmarking: An International Journal - Emerald Insight, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/bij-04-2024-0286/full/html>
 107. Full article: The role of digital twins in lean supply chain management: review and research directions - Taylor & Francis Online, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2024.2372655>
 108. Enhancing supply chain resilience with multi-agent systems and machine learning: a framework for adaptive decision-making | The American Journal of Engineering and Technology, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://theamericanjournals.com/index.php/tajet/article/view/5919>
 109. The impact of multiagent systems on autonomous production and supply chain networks: use cases, barriers and contributions to logistics network resilience - Emerald Insight, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/scm-07-2022-0282/full/html>
 110. Issues and Reflections on DAO: Governance Challenges and Solutions - AIFT, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://hkaift.com/issues-and-reflections-on-dao-governance-challenges-and-solutions/>
 111. Governance Challenges for DAOs and How to Solve Them - MetaBase58, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.metabase58.io/insights/1k3rf122ec0tnt9lxzkb2ekbk60d6w-zcddt>
 112. Architecting the Future: Enterprise Architecture Strategies for Agile and

- Resilient Organizations | RSA Conference, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.rsaconference.com/library/blog/architecting-the-future-enterprise-architecture-strategies-for-agile-and-resilient-organizations>
113. Imagining Agentic Architecture in an Enterprise | by Suteja Kanuri - Medium, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://sutejakanuri.medium.com/imagining-agentic-architecture-in-an-enterprise-832891ab9565>
114. How agentic AI is transforming IT: A CIO's guide - SAP, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.sap.com/germany/resources/how-agentic-ai-transforms-it-cio-guide>
115. The Power of Collaboration between CIOs and CTOs - Maximizing Organizational Success, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.zluri.com/blog/cio-cto-collaboration>
116. AI Agents at Work: Driving Value While Governing Risk - 2toLead, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://www.2tolead.com/resources/ai-agents-at-work-driving-value-while-governing-risk>
117. The Theoretical Basis of Enterprise Architecture: A Critical Review and Taxonomy of Relevant Theories | Request PDF - ResearchGate, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/347728480_The_Theoretical_Basis_of_Enterprise_Architecture_A_Critical_Review_and_Taxonomy_of_Relevant_Theories
118. A Method for Enterprise Architecture Model Slicing - NTNU Open, dernier accès : juillet 30, 2025,
https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/3052369/manuscript_v6-afterpr-0924-1-removedlogo.pdf?sequence=1
119. 2025: The Future of AI Agents in Enterprise Software Architecture | by Senthil | Medium, dernier accès : juillet 30, 2025,
<https://medium.com/@senthilraja.v/2025-the-future-of-ai-agents-in-enterprise-software-architecture-e677314af0a4>