

Industrie 5.0 – Systèmes Sociotechniques

Interopérabilité et Agentique

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

Introduction

L'Industrie 5.0 marque une inflexion paradigmatique, dépassant la simple quête d'automatisation et d'efficacité qui caractérisait son prédécesseur, l'Industrie 4.0. Elle ne doit pas être perçue comme une simple mise à jour technologique, mais comme l'avènement de systèmes sociotechniques complexes, où la collaboration synergique entre l'humain et la machine devient le moteur de la création de valeur. Cette nouvelle ère industrielle réoriente la puissance technologique vers des impératifs sociétaux et environnementaux, cristallisés autour de trois piliers fondamentaux : une approche résolument centrée sur l'humain, un engagement profond pour la durabilité et une exigence de résilience face aux incertitudes croissantes du monde moderne.

La thèse centrale de ce rapport est que la matérialisation de cette vision ambitieuse repose sur la convergence et la synergie de deux leviers techniques fondamentaux. Le premier est **l'interopérabilité**, érigée en un véritable système nerveux de l'entreprise connectée. En brisant les silos de données et de processus, elle crée les conditions nécessaires à une collaboration fluide, à une prise de décision éclairée et à une adaptabilité structurelle. Le second est **l'architecture agentique**, qui se superpose à ce socle d'interopérabilité pour former une couche d'intelligence distribuée, autonome et adaptative. Les systèmes multi-agents (SMA) incarnent la capacité de l'organisation à percevoir son environnement, à raisonner collectivement et à agir de manière coordonnée pour atteindre des objectifs complexes.

Ce document explorera en profondeur cette double hélice technologique. La première partie sera consacrée à l'analyse de l'interopérabilité comme socle de la collaboration et de la résilience, en examinant les architectures modernes (microservices, API, tissus de données) qui la rendent possible. La deuxième partie se concentrera sur l'architecture agentique, en définissant ses principes et en démontrant comment elle constitue la couche d'intelligence qui active les piliers de l'Industrie 5.0. Enfin, la troisième partie proposera une architecture de convergence intégrant ces deux dimensions, ainsi qu'une feuille de route stratégique pour sa mise en œuvre, en abordant les défis cruciaux de la gouvernance, de la sécurité et de l'éthique. L'objectif est de fournir une analyse exhaustive et nuancée de la transformation technique indispensable pour faire de l'Industrie 5.0 une réalité opérationnelle, résiliente et fondamentalement humaine.

Paradigme de l'Industrie 5.0 : Au-delà de l'automatisation

1.1. De l'Industrie 4.0 à 5.0 : Une évolution conceptuelle

L'avènement de l'Industrie 5.0 ne signifie pas l'obsolescence de l'Industrie 4.0 ; il s'agit plutôt d'une évolution conceptuelle qui en intègre les acquis tout en réorientant ses finalités.¹ L'Industrie 4.0 a jeté les bases technologiques de l'usine intelligente en se concentrant sur l'intégration de l'automatisation et de l'échange de données dans les processus de fabrication.¹ Son objectif premier était l'amélioration de l'efficacité, de la productivité et de la qualité par le déploiement de technologies telles que l'Internet Industriel des Objets (IIoT), les systèmes d'exécution de la fabrication (MES) et l'intelligence artificielle (IA) pour l'optimisation des processus.² Dans ce paradigme, la technologie est principalement un outil d'optimisation au service d'un processus préétabli.

L'Industrie 5.0 étend cette vision en plaçant la collaboration homme-machine au cœur de sa démarche, plutôt que de viser le remplacement systématique de l'humain par l'automatisation.¹ Elle cherche à créer des produits et services durables en rééquilibrant la relation entre la technologie et la société.¹ Si l'Industrie 4.0 a perfectionné la mise en réseau des machines, l'Industrie 5.0 ambitionne d'améliorer la mise en réseau et la collaboration tout au long de la chaîne de valeur, incluant plus étroitement les clients, les fournisseurs et les partenaires.¹ Elle ne remplace donc pas l'Industrie 4.0 mais en étend les forces pour rendre les entreprises plus agiles, résilientes et pérennes face aux défis futurs.¹

Ce glissement représente une transformation fondamentale de la relation entre la technologie et l'organisation. L'Industrie 4.0 percevait la technologie comme un moyen d'optimiser des processus humains existants pour des gains d'efficacité. La transition vers l'Industrie 5.0 introduit une vision où la technologie devient un partenaire au sein d'un système sociotechnique, menant à une co-évolution des rôles humains et des processus métier. Le questionnement central n'est plus "comment automatiser ce que font les humains?", mais "que peut faire la technologie pour nous?".⁶ Cette approche centrée sur l'humain implique que le processus lui-même n'est plus statique. Lorsqu'un opérateur collabore avec un agent d'IA, son rôle se transforme : il passe d'un simple exécutant à un stratège, un validateur ou un gestionnaire d'exceptions. Le processus doit donc évoluer pour intégrer ce nouveau rôle hybride, instaurant un cycle vertueux où les avancées technologiques augmentent les capacités humaines, qui à leur tour exigent un soutien technologique plus sophistiqué.

1.2. Trois piliers redéfinis : Approche centrée sur l'humain, Durabilité et Résilience

La vision de l'Industrie 5.0, telle que promue par la Commission Européenne, repose sur trois piliers fondamentaux qui redéfinissent les objectifs de l'activité industrielle au-delà des seules considérations économiques.⁵

Approche centrée sur l'humain (Human-centricity) : Ce pilier place l'humain et son bien-être au centre du modèle de production.⁶ La technologie doit être au service des travailleurs, et non l'inverse. L'objectif est de valoriser leurs compétences uniques, telles que la créativité, la pensée critique et l'expertise de domaine, en les combinant avec la puissance, la précision et la rapidité des machines.¹ Cette approche vise à améliorer la vie des travailleurs plutôt qu'à les remplacer par des robots.⁴ Elle insiste également sur la nécessité de garantir que l'usage de la technologie ne porte pas atteinte aux droits fondamentaux des employés, comme le droit à la vie privée, à l'autonomie et à la dignité humaine.⁶

Durabilité (Sustainability) : L'industrie doit opérer en respectant les limites planétaires.⁶ Ce pilier exige le développement de systèmes de production basés sur des processus circulaires qui favorisent la réutilisation et le recyclage des ressources, la réduction des déchets et la minimisation de l'impact environnemental.³ L'un des objectifs clés est la réduction des émissions de carbone, en ligne avec les engagements climatiques, ce qui implique une transition vers les énergies renouvelables et une optimisation de l'efficacité énergétique à tous les niveaux de la production.⁶

Résilience (Resilience) : La pandémie de COVID-19, ainsi que les tensions géopolitiques et les catastrophes naturelles, ont mis en évidence la fragilité des chaînes de valeur mondiales.⁶ La résilience est donc devenue une nécessité stratégique. Elle se définit comme la capacité de l'industrie à anticiper les perturbations, à y résister et à s'adapter à des situations défavorables pour assurer la continuité opérationnelle.³ La technologie, notamment via la surveillance en temps réel et l'analyse prédictive, est un levier essentiel pour renforcer cette capacité d'adaptation et de réaction face à l'imprévu.³

1.3. Problématique centrale : L'interopérabilité et l'agentique comme double levier technique

La concrétisation de ces trois piliers exige une transformation technique profonde des systèmes d'information et de production. Ce rapport soutient que cette transformation repose sur deux piliers technologiques interdépendants qui, ensemble, forment l'architecture d'un système sociotechnique avancé.

Le premier levier est **l'interopérabilité**. Elle constitue le "système nerveux" de l'entreprise de l'Industrie 5.0. Sans une capacité à faire communiquer de manière fluide et sémantiquement riche des systèmes hétérogènes, les piliers restent des concepts abstraits. La résilience dépend de la capacité à connecter et reconfigurer dynamiquement les maillons de la chaîne de valeur. La durabilité exige l'agrégation de données ESG provenant de sources multiples et disparates. L'approche centrée sur l'humain requiert une vue unifiée de l'opérateur, de son environnement et de ses outils. L'interopérabilité est donc la condition *sine qua non* pour briser les silos de données et de processus.

Le second levier est **l'architecture agentique**. Si l'interopérabilité fournit les "nerfs", l'agentique constitue la couche "d'intelligence distribuée" qui les anime. Elle exploite les flux d'information rendus possibles par l'interopérabilité pour permettre l'autonomie, l'adaptation en temps réel et la collaboration intelligente, que ce soit entre machines ou entre humains et machines. Les systèmes multi-agents incarnent les principes de l'Industrie 5.0 en créant des écosystèmes où des entités autonomes (agents) collaborent pour optimiser les ressources (durabilité), se reconfigurer face aux pannes (résilience) et assister les humains dans leurs tâches (approche centrée sur l'humain).

Partie 1 : L'interopérabilité comme socle de la collaboration et de la résilience

2. Fondements de l'interopérabilité moderne

2.1. Dépassement des architectures monolithiques

Les architectures logicielles traditionnelles, dites monolithiques, ont longtemps été la norme. Conçues comme une seule unité de code unifiée et autonome, elles présentent l'avantage d'une simplicité de développement et de déploiement initiaux.⁷ Dans un monolithe, toutes les fonctionnalités métier sont regroupées au sein d'une unique base de code, ce qui facilite les tests de bout en bout et le débogage dans un environnement centralisé.⁷

Cependant, à mesure que les applications gagnent en complexité et que les besoins métier évoluent, ce modèle architectural devient un frein majeur à l'agilité et à l'innovation. La moindre modification, même mineure, requiert le redéploiement complet de l'application, un processus lourd, chronophage et risqué.⁷ Cette rigidité est en opposition directe avec les impératifs de l'Industrie 5.0. La scalabilité est également un problème majeur : il est impossible de mettre à l'échelle un seul composant de l'application ; c'est l'ensemble du bloc qui doit être dupliqué, entraînant une surconsommation de ressources.⁸ Enfin, et c'est un point critique pour la résilience, une erreur dans un module peut provoquer la panne de l'ensemble du système, créant un point de défaillance unique (single point of failure).⁷ Ces limitations structurelles rendent les architectures monolithiques inadaptées pour construire les systèmes distribués, adaptatifs et résilients qu'exige la nouvelle ère industrielle.

2.2. Architectures orientées services et microservices : Agilité et découplage

Pour surmonter les écueils des monolithes, le paradigme des architectures de microservices s'est imposé. Cette approche consiste à décomposer une application complexe en un ensemble de petits services autonomes, chacun responsable d'une capacité métier spécifique.⁷ Chaque microservice est développé, déployé et mis à l'échelle de manière indépendante, et communique avec les autres via des interfaces bien définies, généralement des API.⁷

Ce découplage radical offre des avantages décisifs pour l'Industrie 5.0 :

- **Agilité et Déploiement Continu** : De petites équipes autonomes peuvent travailler sur des services distincts, ce qui

accélère considérablement les cycles de développement et de livraison. Les mises à jour peuvent être déployées fréquemment et indépendamment pour chaque service, sans impacter le reste du système.⁷

- **Scalabilité Flexible** : Chaque service peut être mis à l'échelle individuellement en fonction de sa charge spécifique. Par exemple, lors d'un pic d'activité, on peut allouer plus de ressources au service de gestion des commandes sans avoir à surdimensionner les autres services, ce qui optimise l'utilisation des ressources et soutient l'objectif de durabilité.⁸
- **Résilience par Isolation des Pannes** : La défaillance d'un microservice n'entraîne pas la panne de toute l'application. Les autres services peuvent continuer à fonctionner, ou des stratégies de dégradation gracieuse peuvent être mises en place. Cette isolation des pannes est un fondement technique direct du pilier de résilience.⁷
- **Flexibilité Technologique** : Les équipes sont libres de choisir la pile technologique (langage de programmation, base de données) la plus appropriée pour chaque service. Cela favorise l'innovation et permet d'attirer de nouveaux talents en utilisant des outils de développement modernes.⁹

Le tableau suivant synthétise ce changement de paradigme architectural et ses implications pour l'Industrie 5.0.

Dimension	Architecture Monolithique	Architecture de Microservices	Implications pour l'Industrie 5.0
Développement	Base de code unique et fortement couplée.	Bases de code multiples, indépendantes et faiblement couplées.	Favorise l'agilité et l'innovation en permettant à des équipes spécialisées de travailler en parallèle.
Déploiement	Déploiement de l'application entière en une seule unité.	Déploiement indépendant de chaque service.	Accélère la mise sur le marché des nouvelles fonctionnalités et réduit les risques liés aux déploiements.
Scalabilité	Mise à l'échelle de l'ensemble de l'application ("tout ou rien").	Mise à l'échelle granulaire, par service.	Optimise l'utilisation des ressources (et permet de répondre dynamiquement aux fluctuations de la demande.
Isolation des Pannes	Point de défaillance unique ; une erreur peut paralyser tout le système.	Les pannes sont contenues au sein d'un service, n'impactant pas les autres.	Permet une haute disponibilité et constitue le socle technique du pilier de Résilience .
Flexibilité Technologique	Pile technologique unique et figée.	Architecture polyglotte ; chaque service peut utiliser	Permet d'adopter les meilleures technologies pour chaque

		la meilleure technologie.	problème et de s'adapter rapidement aux évolutions technologiques.
Maintenance et Complexité	Simple au départ, mais la complexité devient ingérable à grande échelle.	Complexité initiale plus élevée (infrastructure), mais plus facile à gérer et à maintenir à grande échelle.	Permet de construire des systèmes complexes et évolutifs qui soutiennent la vision à long terme de l'entreprise.

Sources : ⁷

2.3. Le rôle des API et des passerelles (API Gateway) dans l'exposition gouvernée des capacités métier

Dans une architecture de microservices, les Interfaces de Programmation d'Applications (API) constituent le contrat de communication standardisé entre les services. Pour gérer et sécuriser ces interactions dans un système distribué, la passerelle d'API (API Gateway) joue un rôle central.¹⁰ Elle agit comme un point d'entrée unique et contrôlé pour toutes les requêtes provenant des clients (applications web, mobiles, partenaires), se positionnant comme un proxy inversé entre le monde extérieur et les services internes.¹⁰

Ses fonctions principales sont cruciales pour la gouvernance, la sécurité et la performance de l'écosystème :

- **Routage et Agrégation** : La passerelle reçoit les requêtes des clients, les analyse et les achemine vers le ou les microservices appropriés. Elle peut également agréger les réponses de plusieurs services en une seule réponse cohérente pour le client, masquant ainsi la complexité de l'architecture sous-jacente.¹⁰
- **Sécurité** : La sécurité est l'un des principaux moteurs de l'adoption des passerelles d'API.¹¹ Elles centralisent la gestion de l'authentification (vérifier qui est l'utilisateur) et de l'autorisation (vérifier ce que l'utilisateur a le droit de faire), protégeant ainsi les services back-end contre les accès non autorisés. Elles peuvent intégrer divers mécanismes d'authentification comme les clés d'API, les jetons JWT ou OAuth.¹¹
- **Gouvernance et Gestion du Trafic** : La passerelle est le point de contrôle idéal pour appliquer des politiques de gouvernance. Elle met en œuvre la limitation de débit (*rate limiting*) pour restreindre le nombre de requêtes qu'un client peut effectuer sur une période donnée, prévenant ainsi les abus et les attaques par déni de service (DDoS) tout en garantissant la stabilité des services back-end.¹⁰
- **Surveillance et Journalisation** : En centralisant le trafic, la passerelle offre un point d'observation unique pour surveiller la santé des API, suivre les temps de réponse, les taux d'erreur et collecter des métriques d'utilisation. Elle fournit une journalisation unifiée qui est essentielle pour le débogage et l'analyse des performances dans un système distribué.¹¹
- **Découplage Client-Service** : En agissant comme une façade, la passerelle d'API dissocie l'interface exposée aux clients de l'implémentation interne des microservices. Les équipes peuvent ainsi modifier, refactoriser ou remplacer des services back-end sans que cela n'impacte les applications clientes, tant que le contrat d'API est respecté.¹⁰

2.4. Architectures événementielles et tissus de données (Data Fabric) pour une communication asynchrone et temps réel

Si les appels API synchrones sont adaptés aux interactions de type requête-réponse, de nombreux processus industriels nécessitent une communication asynchrone et en temps réel. Les architectures événementielles (*event-driven architectures*) répondent à ce besoin en permettant aux services de communiquer via des événements, sans couplage direct. Un service produit un événement (ex: "Machine X a terminé la pièce Y") et le publie sur un bus d'événements, et d'autres services intéressés s'y abonnent et réagissent en conséquence.

Le concept de **tissu de données (Data Fabric)** étend cette idée d'intégration fluide à l'échelle de toute l'entreprise. Un Data Fabric est une architecture de données moderne qui vise à briser les silos en créant une couche intégrée et unifiée de données et de processus de connexion, quel que soit l'endroit où les données sont stockées (sur site, dans le cloud, dans des systèmes legacy).¹³ Plutôt que de déplacer physiquement toutes les données dans un entrepôt central, le Data Fabric fournit un accès virtuel et en temps réel à des données distribuées et hétérogènes.¹⁵

Ses composants clés incluent :

- **Connecteurs de données** pour se brancher aux différentes sources (bases de données, applications, capteurs IIoT).¹³
- Une **couche sémantique et de modélisation** qui crée un langage commun et un sens partagé pour les données, souvent à l'aide d'ontologies.¹³
- Des **mécanismes de gouvernance et de sécurité** centralisés pour garantir la qualité et la protection des données.¹⁵
- L'**automatisation** des tâches de gestion des données (intégration, nettoyage, enrichissement) grâce à l'IA et au machine learning.¹³

Cette architecture est fondamentale pour les systèmes de l'Industrie 5.0, car elle constitue le socle sémantique indispensable à une collaboration intelligente. Un Data Fabric n'est pas seulement un outil d'intégration de données ; il est l'environnement partagé et riche en contexte dont les systèmes multi-agents (qui seront abordés dans la partie 2) ont besoin pour percevoir, raisonner et agir de manière cohérente. Les environnements industriels sont caractérisés par une hétérogénéité extrême, avec des données cloisonnées dans des systèmes legacy, des plateformes IIoT et des ERP.¹⁶ Le Data Fabric est spécifiquement conçu pour surmonter ces silos en offrant une vue unifiée et sémantiquement enrichie. Il devient ainsi le "modèle du monde" ou l'entrée sensorielle partagée pour l'ensemble du système multi-agents. Un agent chargé d'optimiser la consommation d'énergie peut interroger le Data Fabric pour obtenir en temps réel l'état d'une machine, le planning de production et le prix de l'électricité, même si ces informations proviennent de trois systèmes physiques distincts. Le Data Fabric passe ainsi du statut de concept d'architecture de données à celui de prérequis critique pour l'intelligence distribuée promise par l'Industrie 5.0.

3. L'interopérabilité au service des piliers de l'Industrie 5.0

L'adoption d'architectures interopérables n'est pas une fin en soi, mais un moyen technique essentiel pour concrétiser les trois piliers stratégiques de l'Industrie 5.0.

3.1. Approche humaine : Unifier les données pour une vue à 360° de l'opérateur et du client

Pour que l'approche soit véritablement centrée sur l'humain, il est impératif de comprendre l'opérateur dans son contexte de travail global. L'interopérabilité est la clé pour construire cette compréhension en brisant les silos de données qui séparent les informations relatives à l'opérateur. En agrégeant des données de sources multiples et hétérogènes —

données de performance des machines qu'il utilise, données ergonomiques et biométriques issues de capteurs portables (*wearables*), données de son parcours de formation, données RH sur ses compétences — il devient possible de créer une vue unifiée à 360 degrés de l'opérateur.

Cette vue holistique peut alimenter des applications d'assistance personnalisées. Par exemple, une interface homme-machine (IHM) pourrait s'adapter dynamiquement en fonction du niveau de fatigue ou de stress détecté, ou un système pourrait recommander une micro-formation juste à temps pour une tâche complexe. Des concepts avancés comme le "jumeau numérique de l'opérateur" (*digital twin of the operator*)¹⁸ ou la "vue à 360° du travailleur" (*Worker 360-Degree View*)²⁰ reposent entièrement sur cette capacité à intégrer des flux de données disparates pour modéliser et soutenir l'humain de manière proactive et personnalisée.

3.2. Résilience : Assurer la continuité opérationnelle par le découplage et la redondance des services

La résilience industrielle est une conséquence architecturale directe de l'interopérabilité. Comme vu précédemment, le découplage inhérent aux architectures de microservices garantit que la défaillance d'un composant reste isolée et n'entraîne pas un arrêt en cascade de l'ensemble du système de production.⁷ Cette isolation des pannes est la première ligne de défense pour la continuité opérationnelle.

Au-delà de cela, l'interopérabilité via des API standardisées facilite grandement la mise en place de stratégies de résilience avancées. Elle permet de concevoir des systèmes où des services redondants peuvent prendre le relais de manière transparente en cas de défaillance. À une échelle plus large, des initiatives comme les "espaces de données industriels" (*industrial data spaces*) illustrent le potentiel de l'interopérabilité inter-entreprises.²¹ Dans ces écosystèmes, les acteurs d'une même chaîne de valeur partagent des données de manière sécurisée et gouvernée. En cas de perturbation, comme une rupture d'approvisionnement chez un fournisseur, cette visibilité partagée permet au réseau de réagir collectivement, par exemple en identifiant des sources alternatives ou en réallouant la production, renforçant ainsi la résilience de l'ensemble de la chaîne de valeur.²¹

3.3. Durabilité : Agréger les données multi-sources pour un pilotage ESG (Environnemental, Social, Gouvernance) efficace

Le pilotage de la durabilité et des critères ESG est, par nature, un problème de données distribuées. Pour mesurer et améliorer l'empreinte environnementale, il est nécessaire de collecter, d'agréger et d'analyser des données provenant de l'ensemble de la chaîne de valeur : la consommation énergétique en temps réel de chaque machine sur le site de production, les émissions de carbone des partenaires logistiques, les données sur la circularité des matériaux provenant des fournisseurs, ainsi que les indicateurs sociaux liés au bien-être des employés.

L'interopérabilité est le seul moyen d'automatiser cette collecte de données à grande échelle et de la rendre exploitable.²² Des plateformes de suivi en temps réel de l'empreinte carbone, par exemple, s'appuient sur des API pour se connecter aux systèmes financiers (pour analyser les factures d'énergie), aux systèmes de gestion des transports (pour calculer les émissions logistiques) et aux plateformes des fournisseurs.²⁴ En unifiant ces données hétérogènes dans un tableau de bord unique, l'interopérabilité fournit aux décideurs la vue d'ensemble indispensable pour fixer des objectifs de durabilité, suivre les progrès et prendre des décisions éclairées pour réduire l'impact environnemental de l'entreprise.

Partie 2 : L'architecture agentique comme couche d'intelligence distribuée

4. Principes des systèmes multi-agents (SMA)

4.1. L'agent logiciel : Autonomie, proactivité, réactivité et socialité

Au cœur de l'architecture agentique se trouve l'agent logiciel. Il ne s'agit pas d'un simple programme ou script, mais d'une entité logicielle encapsulée qui perçoit son environnement (numérique ou physique) par le biais de capteurs ou de flux de données, et agit sur cet environnement par le biais d'effecteurs ou d'API de manière autonome, afin d'atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu.²⁷ Les caractéristiques fondamentales qui distinguent un agent d'un objet logiciel classique sont ses propriétés comportementales.²⁹

- **Autonomie** : C'est la capacité de l'agent à opérer sans l'intervention directe et constante d'un humain ou d'un autre agent. Il contrôle ses propres actions et son état interne pour poursuivre ses objectifs.²⁷ Dans un système complexe, cette autonomie lui permet de prendre des décisions locales basées sur ses propres informations et règles.²⁹
- **Réactivité** : L'agent est situé dans un environnement dynamique. Sa capacité de réactivité lui permet de percevoir les changements dans cet environnement et d'y répondre de manière opportune et appropriée.²⁷ Un agent purement réactif agit selon un modèle simple de type stimulus-réponse.²⁹
- **Proactivité** : Au-delà de la simple réaction, un agent proactif est capable de prendre des initiatives pour atteindre ses objectifs. Il ne se contente pas d'attendre que l'environnement change, mais agit de manière opportune et orientée vers ses buts, en planifiant ses actions.²⁷
- **Socialité** : Un agent évolue rarement seul. La socialité est sa capacité à interagir avec d'autres agents (logiciels ou humains) via un langage de communication commun. Ces interactions peuvent prendre la forme de coopération (travailler ensemble vers un but commun), de coordination (gérer les interdépendances) ou de négociation (trouver un compromis pour résoudre des conflits d'intérêts).²⁷

4.2. Distinction fondamentale avec l'IA centralisée et l'automatisation par script (RPA)

Pour saisir la valeur ajoutée de l'architecture agentique, il est essentiel de la distinguer clairement d'autres paradigmes d'automatisation et d'intelligence artificielle.

La **Robotic Process Automation (RPA)** est une technologie conçue pour automatiser des tâches humaines répétitives et basées sur des règles strictes. Un robot RPA fonctionne en suivant un script précis, imitant les clics et les saisies d'un utilisateur sur une interface graphique.³² La différence fondamentale réside dans la logique d'exécution : la RPA "suit des instructions". Elle est efficace pour des processus stables et structurés, mais elle est fragile face à l'imprévu. Le moindre changement dans une interface ou une règle métier peut faire échouer le script, car le robot n'a aucune compréhension du contexte ou de la finalité de sa tâche.³³ À l'inverse, un agent IA "suit un objectif". Il est doté d'une capacité de raisonnement qui lui permet de comprendre une demande, même formulée de manière imparfaite, de planifier une séquence d'actions pour atteindre son but, et de s'adapter si des obstacles surviennent.³³

L'**IA centralisée**, quant à elle, repose sur un modèle monolithique unique (un "cerveau" central) qui tente de résoudre un problème dans sa globalité. Bien que puissante pour des tâches bien définies, cette approche présente des limites en termes de scalabilité et de résilience. Le modèle central peut devenir un goulot d'étranglement et constitue un point de défaillance unique : s'il tombe en panne, tout le système s'arrête.³⁵ Un

Système Multi-Agents (SMA) adopte une approche radicalement différente en distribuant l'intelligence et le contrôle. Au lieu d'un seul grand modèle, un SMA est composé de multiples agents spécialisés qui collaborent. La solution à un problème complexe émerge de leurs interactions décentralisées. Cette architecture distribuée rend le système intrinsèquement plus robuste (la panne d'un agent n'est pas catastrophique), plus scalable (on peut ajouter de nouveaux agents sans refondre le système) et plus adaptable (les agents peuvent se réorganiser dynamiquement).²⁸

Le tableau ci-dessous offre une analyse comparative de ces trois technologies.

Critère	Robotic Process Automation (RPA)	IA Centralisée	Système Multi-Agents (SMA)
Logique Fondamentale	Suivi de règles ("Comment faire")	Optimisation globale	Orientation vers un objectif ("Quoi faire")
Adaptabilité au Changement	Faible (scripts rigides et fragiles)	Modérée (nécessite un réentraînement complet du modèle central)	Élevée (adaptation locale des agents et comportement émergent)
Prise de Décision	Scriptée, déterministe	Centralisée, descendante (<i>top-down</i>)	Distribuée, ascendante (<i>bottom-up</i>)
Résilience	Faible (point de défaillance unique dans le processus)	Faible (point de défaillance unique dans le modèle central)	Élevée (décentralisée, tolérante aux pannes)
Cas d'Usage Idéal	Tâches stables, répétitives et à faible variabilité.	Problèmes complexes mais bien définis et centralisables.	Problèmes complexes, dynamiques, distribués et ouverts.

Sources : ³²

4.3. L'intelligence émergente par la collaboration et la négociation entre agents

La caractéristique la plus puissante et la plus distinctive des SMA est le phénomène d'**intelligence émergente**. Il s'agit de l'apparition de comportements collectifs cohérents, intelligents et souvent non prévus, qui ne sont explicitement programmés dans aucun agent individuel, mais qui "émergent" de la multitude d'interactions locales simples entre les agents.²⁹ Chaque agent poursuit ses propres objectifs, en suivant des règles de comportement relativement simples, mais c'est la dynamique de leurs interactions — communication, coordination, coopération, compétition, négociation — qui donne naissance à une structure et à une intelligence au niveau macroscopique du système.²⁸

Ce principe d'auto-organisation, où un ordre global naît d'interactions locales sans contrôle central, est au cœur de la

capacité d'adaptation des SMA.⁴⁰ Par exemple, dans une simulation de trafic, des agents "voiture" cherchant simplement à optimiser leur propre temps de trajet peuvent, par leurs interactions, créer collectivement des flux de trafic fluides ou, au contraire, des embouteillages massifs. Des mécanismes d'apprentissage, comme l'apprentissage par renforcement (*Reinforcement Learning*), peuvent être intégrés aux agents pour leur permettre d'affiner leurs stratégies d'interaction au fil du temps, améliorant ainsi la performance collective du système.⁴⁰ Cette capacité à résoudre des problèmes globaux de manière adaptative et décentralisée est ce qui rend les SMA particulièrement pertinents pour les environnements complexes et imprévisibles de l'Industrie 5.0.²⁸

5. L'agentique au cœur des piliers de l'Industrie 5.0

L'architecture agentique n'est pas une simple curiosité technologique ; elle est l'implémentation directe des principes de l'Industrie 5.0, en fournissant les mécanismes d'autonomie, de collaboration et d'optimisation distribuée nécessaires pour activer ses trois piliers.

5.1. Approche humaine : Le paradigme de la collaboration homme-agent

5.1.1. L'agent comme "conseiller augmenté" ou "jumeau numérique" de l'employé

Dans le paradigme de l'Industrie 5.0, l'agent logiciel transcende son rôle d'outil pour devenir un véritable collaborateur de l'opérateur humain. Il peut agir comme un "conseiller augmenté", en analysant en temps réel des flux de données complexes (provenant de capteurs, de systèmes de production, etc.) pour fournir des recommandations contextuelles, alerter sur des risques ou suggérer des optimisations.

Le concept de "jumeau numérique de l'employé" va encore plus loin.¹⁸ Il s'agit de créer un agent logiciel personnalisé qui modélise les compétences, les préférences, la charge cognitive et même l'état de fatigue de l'opérateur. Cet agent peut alors lui fournir un soutien sur mesure : simplifier une interface s'il détecte des signes de stress, proposer des pauses au moment opportun, ou encore filtrer les informations pour ne présenter que les plus pertinentes. Cette symbiose homme-agent vise à augmenter les capacités humaines, à réduire la charge mentale et à améliorer à la fois la performance et le bien-être au travail.

5.1.2. Modèles d'interaction "Human-in-the-Loop" pour garantir le contrôle et la confiance

L'autonomie des agents, bien que puissante, doit être encadrée, surtout lorsque les décisions ont des conséquences importantes sur la sécurité, la qualité ou les coûts.⁴² Pour cette raison, les modèles d'interaction de type "Human-in-the-Loop" (HITL) sont fondamentaux pour une collaboration homme-agent réussie et digne de confiance.

Dans un modèle HITL, l'agent n'agit pas en totale autonomie pour les tâches critiques. Il effectue le travail préparatoire — collecte des données, analyse, élaboration d'un plan d'action — mais avant d'exécuter l'action finale, il sollicite une validation, une confirmation ou un choix de la part de l'opérateur humain.⁴⁴ Ce point de contrôle garantit que l'humain conserve l'autorité et le contrôle ultimes sur le système. Cette approche est essentielle pour gérer les cas ambigus ou les situations imprévues ("edge cases") où le jugement, l'intuition et l'éthique de l'humain sont irremplaçables.⁴² Des frameworks techniques, comme mahilo qui permet de créer des systèmes multi-agents où chaque agent peut interagir avec un superviseur humain, ou les architectures proposées pour des services comme Amazon Bedrock, montrent comment implémenter concrètement ces boucles de validation, qui sont la clé de la confiance et de l'adoption de ces systèmes.⁴⁵

5.2. Résilience : L'auto-organisation pour une adaptation dynamique

5.2.1. Détection de pannes et reconfiguration autonome des processus

La résilience, dans sa forme la plus avancée, est incarnée par la capacité d'un SMA à s'auto-organiser face à une perturbation. Imaginons un atelier de production où chaque machine, chaque robot et chaque poste de travail est représenté par un agent logiciel. Ces agents communiquent et coordonnent leurs actions pour assurer le flux de production.

Si un agent-machine détecte une panne imminente ou un dysfonctionnement, il peut immédiatement diffuser cette information aux autres agents du système. Plutôt que d'attendre une intervention humaine, le collectif d'agents peut initier un processus de reconfiguration autonome. Par la négociation, les agents peuvent décider de dérouter le flux de production vers des machines alternatives, de réallouer les tâches prévues pour la machine défaillante et d'ajuster le planning global pour minimiser l'impact de la panne.⁴¹ Cette capacité d'adaptation dynamique et décentralisée, où le système se "guérit" lui-même, est une manifestation directe de la résilience permise par l'intelligence émergente.²⁹

5.2.2. Cas d'usage : Systèmes collaboratifs de détection de fraude

Bien que provenant du secteur financier, les systèmes collaboratifs de détection de fraude offrent un excellent exemple de résilience par l'intelligence distribuée, transposable au monde industriel. Les schémas de fraude, comme les anomalies de production, sont de plus en plus complexes et évolutifs. Une approche monolithique peine à s'adapter.

Les frameworks multi-agents de détection de fraude décomposent le problème en tâches spécialisées, chacune assignée à un agent.⁴⁸ Un agent peut être expert dans l'analyse des schémas de transaction, un autre dans la vérification du profil comportemental de l'utilisateur, un troisième dans le croisement d'informations avec des bases de données externes sur la réputation des commerçants, et un quatrième dans la génération d'explications compréhensibles pour les auditeurs.⁴⁹ Un agent "orchestrateur" ou une collaboration décentralisée permet de synthétiser les signaux de risque provenant de chaque agent pour former une évaluation globale et prendre une décision (bloquer, valider, ou demander une vérification humaine).⁵¹ Cette architecture distribuée est intrinsèquement plus robuste et adaptable aux nouvelles menaces. De la même manière, dans une usine, des agents spécialisés (qualité, maintenance, logistique, sécurité) peuvent collaborer pour détecter, diagnostiquer et réagir à des anomalies de production complexes qui seraient invisibles pour un système de surveillance centralisé.

5.3. Durabilité : L'optimisation distribuée des ressources

5.3.1. Négociation entre agents pour l'efficacité énergétique des infrastructures

La durabilité passe par une gestion intelligente et optimisée des ressources, notamment de l'énergie. Dans une usine intelligente ou un bâtiment connecté à un réseau électrique intelligent (*smart grid*), chaque équipement énergivore (machine-outil, four, système de climatisation) peut être doté d'un agent logiciel.⁵³ L'objectif de chaque agent est de réaliser sa tâche tout en minimisant sa consommation d'énergie et ses coûts.

Ces agents peuvent négocier entre eux et avec l'agent représentant le réseau électrique. Par exemple, si le prix de l'électricité est élevé en raison d'un pic de demande, un agent-machine peut décider de reporter une tâche non critique à plus tard. Il doit alors communiquer cette intention aux autres agents pour s'assurer que ce report ne perturbe pas l'ensemble du planning de production. Par ce jeu de négociations locales et continues, le système peut lisser sa consommation d'énergie globale, éviter les pics coûteux et maximiser l'utilisation des énergies renouvelables lorsqu'elles sont disponibles. Cette optimisation distribuée et en temps réel permet de réaliser des gains significatifs en matière

d'efficacité énergétique et de réduction des coûts, contribuant directement au pilier de la durabilité.⁵³

5.3.2. Optimisation en temps réel des chaînes logistiques

Les chaînes logistiques sont des systèmes distribués par nature, ce qui en fait un domaine d'application idéal pour les SMA.⁵⁴ Dans ce contexte, des agents peuvent représenter les différents acteurs et éléments de la chaîne : les entrepôts, les flottes de véhicules, les commandes des clients, et même les conteneurs individuels.

En partageant des informations en temps réel via la couche d'interopérabilité (état des stocks, position GPS des véhicules, conditions de trafic, nouvelles commandes), ces agents peuvent collaborer pour optimiser la chaîne logistique de manière dynamique. Par exemple, un agent-véhicule peut ajuster son itinéraire pour éviter un embouteillage, tandis qu'un agent-entrepôt peut anticiper une rupture de stock et déclencher une commande de réapprovisionnement de manière proactive. Cette intelligence collective permet d'optimiser les tournées, de réduire les kilomètres parcourus à vide, de minimiser la consommation de carburant et, par conséquent, de réduire l'empreinte carbone de la logistique. Le cas de DHL, qui a réussi à réduire ses dépenses en carburant de 15% grâce à une telle approche, illustre de manière tangible l'impact des SMA sur la durabilité.⁵⁵

Partie 3 : Architecture de convergence et feuille de route

6. Modèle architectural de référence

Pour construire les systèmes sociotechniques de l'Industrie 5.0, il est nécessaire de disposer d'un modèle architectural de référence qui structure la convergence de l'interopérabilité et de l'agentique. S'inspirant de cadres existants comme RAMI (Reference Architecture Model for Industrie 4.0) et des propositions émergentes pour des architectures centrées sur l'humain et l'IA⁵⁶, nous proposons un modèle en quatre couches superposées.

6.1. *Superposition des couches : Infrastructure, Interopérabilité, Agentique, Interaction*

1. **Couche 1 - Infrastructure (Physique & Cloud)** : C'est la base matérielle et de calcul du système. Elle englobe les actifs physiques de l'usine (machines, robots, équipements), les capteurs de l'Internet Industriel des Objets (IIoT) qui collectent les données, l'infrastructure réseau (filaire, 5G) qui assure la connectivité, et les ressources de calcul, qu'elles soient en périphérie (*edge computing*) pour un traitement à faible latence ou dans le cloud pour une puissance de calcul et de stockage à grande échelle.
2. **Couche 2 - Interopérabilité (Le Système Nerveux)** : Cette couche est le socle qui unifie les données et expose les fonctionnalités de la couche d'infrastructure de manière standardisée. C'est ici que l'on trouve les architectures de microservices, les passerelles d'API qui gouvernent l'accès aux services, les bus d'événements qui permettent la communication asynchrone, et le tissu de données (Data Fabric) qui offre une vue sémantique unifiée de toutes les données de l'entreprise. Cette couche transforme un ensemble hétérogène de technologies en un écosystème cohérent et accessible.
3. **Couche 3 - Agentique (L'Intelligence Distribuée)** : C'est la couche de décision et d'action autonomes. Elle est peuplée d'une multitude d'agents logiciels qui consomment les données et les services de la couche d'interopérabilité. On y trouve une diversité d'agents : des agents spécialisés dédiés à des tâches spécifiques (maintenance prédictive, optimisation énergétique, planification logistique), des agents coordinateurs ou orchestrateurs qui gèrent des processus complexes, et des agents d'interface qui servent de pont avec les utilisateurs humains. C'est dans cette couche que l'autonomie, l'adaptation et l'intelligence émergente prennent vie.

4. **Couche 4 - Interaction (La Couche SocioTechnique)** : C'est la couche supérieure qui matérialise la collaboration homme-machine. Elle comprend l'ensemble des interfaces et des protocoles qui permettent aux opérateurs humains d'interagir avec le système agentique. Cela inclut des tableaux de bord de supervision avancés, des assistants conversationnels (chatbots, voicebots) pour un dialogue en langage naturel, des applications de réalité augmentée ou virtuelle qui superposent des informations numériques au monde réel, et les mécanismes de "Human-in-the-Loop" (HITL) qui permettent aux humains de valider ou d'orienter les décisions des agents.

6.2. Le rôle des ontologies et des modèles sémantiques partagés pour une compréhension commune

Pour que la communication entre les couches d'interopérabilité et d'agentique soit efficace, et pour que les agents (et les humains) puissent collaborer sans ambiguïté, une simple interopérabilité syntaxique (partager des données dans un format commun comme JSON) ne suffit pas. Il faut une **interopérabilité sémantique** : une compréhension partagée de la signification des données échangées.

C'est le rôle fondamental des **ontologies** et des modèles sémantiques.⁵⁹ Une ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée. En d'autres termes, elle définit le vocabulaire d'un domaine métier : les concepts clés (ex: "Machine", "Panne", "Ordre de Production"), leurs attributs, et les relations qui les lient (ex: une "Panne" *affecte* une "Machine", qui *exécute* un "Ordre de Production").⁵⁹

En standardisant cette sémantique à l'échelle de l'entreprise, on crée un "langage commun" que tous les systèmes et tous les agents peuvent comprendre.⁶⁰ Ainsi, un agent de maintenance peut interpréter correctement une alerte provenant d'un agent de production, même si leurs systèmes logiciels sous-jacents sont totalement différents. Les ontologies sont le ciment sémantique qui assure la cohérence et l'intelligence des interactions au sein de l'architecture de convergence.

6.3. Intégration des systèmes existants (*legacy*) dans l'écosystème agentique

Une transformation vers l'Industrie 5.0 se heurte inévitablement à la réalité des systèmes d'information existants, souvent composés d'applications monolithiques et de technologies anciennes (*legacy*).¹⁶ Tenter de remplacer l'ensemble de ces systèmes en une seule fois est une approche risquée, coûteuse et souvent vouée à l'échec.

Une stratégie plus pragmatique et efficace consiste à "encapsuler" ces systèmes *legacy* pour les intégrer dans la nouvelle architecture.¹⁷ En utilisant les technologies de la couche d'interopérabilité, il est possible de créer une façade moderne autour d'un système ancien. Par exemple, on peut développer une couche d'API qui expose les fonctionnalités et les données d'un système mainframe comme des services REST standardisés.¹⁷ Des plateformes d'intégration en tant que service (iPaaS) peuvent également être utilisées pour créer des connecteurs qui traduisent les protocoles et formats de données anciens en formats modernes.¹⁷

Grâce à cette approche, les systèmes *legacy* deviennent des citoyens de première classe dans le nouvel écosystème. Les agents de la couche agentique peuvent interagir avec un ERP vieux de 20 ans via une API moderne, sans avoir besoin de connaître sa complexité interne. Cela permet une modernisation incrémentale, préservant les investissements existants tout en bénéficiant de l'agilité et de l'intelligence de la nouvelle architecture.

7. Stratégies de mise en œuvre et gouvernance

7.1. Approche incrémentale et identification des cas d'usage à forte valeur

Le déploiement d'une architecture aussi transformative ne peut se faire par une approche de type "big bang". Une stratégie incrémentale, itérative et guidée par la valeur est indispensable pour garantir le succès, maîtriser les risques et assurer l'adhésion des équipes.¹⁶ La méthodologie recommandée se décompose en plusieurs étapes clés :

1. **Identification des cas d'usage** : Établir une liste exhaustive de cas d'usage potentiels en combinant une approche descendante (*top-down*), alignée sur les objectifs stratégiques de l'entreprise, et une approche ascendante (*bottom-up*), en collectant les idées et les points de douleur des équipes opérationnelles sur le terrain.¹⁶
2. **Priorisation par la valeur** : Évaluer et prioriser cette liste de cas d'usage sur la base de critères clairs, tels que la valeur ajoutée potentielle (gains de productivité, réduction des coûts, amélioration de la qualité, impact ESG), le retour sur investissement (ROI) et la faisabilité technique et organisationnelle.¹⁶
3. **Projets pilotes** : Sélectionner les cas d'usage les plus prometteurs pour mener des projets pilotes sur un périmètre limité. Ces pilotes permettent de tester la technologie, de valider les bénéfices attendus, d'identifier les défis imprévus et de démontrer la valeur de l'approche aux parties prenantes.¹⁶
4. **Déploiement à l'échelle** : Sur la base du succès des pilotes, planifier le déploiement progressif des solutions validées à travers l'organisation, en capitalisant sur les leçons apprises et en mettant en place les structures de support et de formation nécessaires.

7.2. Gouvernance des données, des API et du cycle de vie des agents

La complexité inhérente à un système distribué d'agents et de services impose la mise en place d'un cadre de gouvernance robuste pour assurer la cohérence, la sécurité, la fiabilité et la confiance.⁶³ Cette gouvernance doit être pensée de manière intégrée, couvrant à la fois les API (le "comment" de la communication) et les agents (le "qui" et le "pourquoi" de l'action).

- **Gouvernance des API** : Il est crucial d'établir des politiques claires pour l'ensemble du cycle de vie des API : conception (en utilisant des standards comme OpenAPI), sécurité (authentification, autorisation), gestion des versions, surveillance et documentation. Selon la culture et la taille de l'organisation, des modèles de gouvernance centralisés (une équipe unique définit les règles), décentralisés (chaque équipe est autonome) ou fédérés (un cadre commun avec une flexibilité locale) peuvent être adoptés.⁶³
- **Gouvernance des Agents** : De même, la gouvernance doit s'appliquer à tout le cycle de vie de l'agent, de son idéation à son retrait.⁶⁶ Cela implique de définir des rôles et des responsabilités clairs (par exemple, un "Propriétaire d'Agent" responsable de son objectif métier, et un "Gardien Technique" responsable de son implémentation).⁶⁶ Il est également nécessaire de mettre en place des processus de validation, de test en environnement contrôlé (*sandbox*), de surveillance continue de la performance et du comportement, et d'audit régulier pour s'assurer que l'agent reste aligné avec ses objectifs initiaux et les principes éthiques de l'entreprise.⁶⁸

Le tableau suivant propose un cadre de gouvernance fédérée pour le cycle de vie conjoint des API et des agents.

Phase du Cycle de Vie	Aspect de la Gouvernance	Activités et Contrôles Clés	Rôles Responsables
Conception & Découverte	Standardisation & Alignement Stratégique	Définition de l'objectif métier de l'agent. Spécification du contrat d'API (OpenAPI). Classification du risque et de l'autonomie de l'agent. Alignement sur les ontologies d'entreprise. Définition des KPI de performance et de confiance.	AI Agent Owner, Architecte SI, Compliance & Risk Lead
Implémentation & Test	Qualité & Sécurité par Conception	Développement sécurisé (code, dépendances). Tests unitaires et d'intégration. Simulation de scénarios en <i>sandbox</i> . Validation des biais et de l'équité. Tests de robustesse (gestion des erreurs, <i>edge cases</i>).	Technical Steward, Équipe de Développement, Équipe Sécurité
Déploiement & Approbation	Déploiement Contrôlé & Confiance	Déploiement progressif (<i>shadow mode</i> , <i>canary release</i>). Validation formelle par les parties prenantes (métier, juridique). Gestion des accès et des permissions (API, données). Activation des mécanismes de supervision humaine (HITL).	AI Agent Owner, Technical Steward, Opérations IT
Monitoring & Amélioration	Performance & Alignement Continu	Surveillance en temps réel des KPI (performance, coût, comportement). Détection de dérive (modèle, données). Audits périodiques de conformité et de sécurité. Collecte et intégration du feedback utilisateur (boucle HITL).	Reviewer, AI Agent Owner, Opérations IT
Retrait	Gestion de Fin de Vie	Planification du retrait et communication aux dépendances. Archivage sécurisé des données et des journaux d'audit. Désactivation des accès et des API.	Technical Steward, AI Agent Owner

Sources : ⁶³

7.3. Défis : Complexité, sécurité des systèmes distribués et considérations éthiques

La mise en œuvre d'une telle architecture n'est pas sans défis.

- **Complexité** : La gestion d'un écosystème composé de centaines de microservices et potentiellement de milliers d'agents est intrinsèquement complexe.³⁷ Il est indispensable de s'équiper d'outils avancés pour la supervision, l'observabilité (journaux, traces, métriques), l'orchestration et la gestion de catalogue de services et d'agents pour ne pas perdre le contrôle.⁷
- **Sécurité des systèmes distribués** : L'architecture distribuée augmente considérablement la surface d'attaque par rapport à un monolithe. Chaque API, chaque agent, chaque canal de communication est un point d'entrée potentiel pour une attaque. La sécurisation des communications inter-agents, la protection robuste des API contre les menaces (OWASP API Security Top 10), la gestion des identités et des accès pour les agents, et la prévention des comportements malveillants d'agents compromis sont des préoccupations critiques qui doivent être adressées dès la conception.⁷⁴
- **Considérations Éthiques** : Ce défi est au cœur de la promesse de l'Industrie 5.0. L'autonomie des agents soulève des questions fondamentales qui ne peuvent être ignorées.
 - **Responsabilité (Accountability)** : Lorsqu'un agent autonome prend une décision qui entraîne un préjudice (un arrêt de production, un accident), qui est responsable? Le développeur, l'entreprise qui le déploie, l'opérateur qui le supervise? Il est impératif d'établir des cadres de responsabilité clairs et de garantir une traçabilité complète des décisions des agents via des pistes d'audit immuables.⁴³
 - **Biais et Équité** : Les agents qui s'appuient sur le machine learning peuvent apprendre et amplifier les biais présents dans les données historiques sur lesquelles ils sont entraînés. Cela peut conduire à des décisions discriminatoires. Des audits de biais réguliers, l'utilisation de jeux de données diversifiés et des techniques de mitigation des biais sont nécessaires pour garantir l'équité.⁷⁷
 - **Transparence et Explicabilité (XAI)** : Pour que les humains puissent faire confiance aux agents et les superviser efficacement, leurs décisions ne doivent pas être des "boîtes noires". Les techniques d'IA explicable (XAI) doivent être intégrées pour que les agents puissent justifier leurs raisonnements et leurs actions de manière compréhensible pour un utilisateur humain.⁷⁹

En définitive, dans l'Industrie 5.0, la gouvernance et l'éthique ne sont pas des contraintes à appliquer après coup, mais des exigences architecturales fondamentales. La confiance, qui est la pierre angulaire de la collaboration sociotechnique, doit être intégrée "par conception" (*by design*). L'échec à le faire saperait le pilier même de l'approche centrée sur l'humain en créant des systèmes opaques, irresponsables et indignes de confiance. L'architecture doit donc nativement inclure des mécanismes de gouvernance : des points de contrôle HITL pour les actions critiques, des pistes d'audit immuables dans la couche de communication, et des services d'explicabilité que les agents peuvent invoquer. La gouvernance devient ainsi l'implémentation technique de la confiance.

Conclusion

8.1. Synthèse : L'interopérabilité (le système nerveux) et l'agentique (l'intelligence distribuée) : un duo indissociable

Ce rapport a démontré que la transition vers l'Industrie 5.0 est bien plus qu'une simple évolution technologique ; c'est une refondation des principes de l'industrie autour de l'humain, de la durabilité et de la résilience. La réalisation de cette vision ambitieuse dépend de manière critique de la mise en place d'une architecture sociotechnique avancée, dont les

fondations reposent sur un duo indissociable : l'interopérabilité et l'architecture agentique.

L'interopérabilité, rendue possible par les architectures de microservices, les API et les tissus de données, agit comme le système nerveux de l'entreprise. Elle brise les silos, permet la circulation fluide et sémantiquement riche de l'information, et fournit le socle indispensable à toute forme de collaboration et d'adaptation. Cependant, l'interopérabilité seule ne crée que des "tuyaux" connectés ; elle est nécessaire mais pas suffisante.

C'est l'architecture agentique qui vient se superposer à ce système nerveux pour former une couche d'intelligence distribuée. Les systèmes multi-agents, avec leurs propriétés d'autonomie, de proactivité et de socialité, exploitent les flux d'information pour permettre au système de percevoir, de raisonner et d'agir de manière coordonnée, flexible et résiliente. L'agentique seule, sans un accès unifié aux données et aux capacités métier, serait aveugle et impuissante. C'est leur combinaison synergique qui donne naissance à une entreprise véritablement cognitive et adaptative, capable de répondre dynamiquement aux défis complexes du monde moderne.

8.2. Perspectives : L'évolution vers des organisations sociotechniques résilientes et centrées sur l'humain

L'adoption de ces architectures de convergence ne transformera pas seulement la technologie, mais également, et de manière plus profonde, les structures organisationnelles, les compétences et la nature même du travail. Les hiérarchies rigides et les processus figés laisseront place à des réseaux plus fluides et adaptatifs d'équipes hybrides, composées d'humains et d'agents collaborant pour atteindre des objectifs communs.

L'avenir de l'industrie ne réside pas dans la poursuite d'une automatisation totale qui marginaliserait l'humain, mais dans la conception méticuleuse de ces nouvelles organisations sociotechniques. Le défi majeur sera de cultiver une symbiose où l'intelligence humaine — avec sa créativité, son intuition et son jugement éthique — et l'intelligence artificielle — avec sa capacité à traiter des volumes massifs de données et à opérer à grande vitesse — se complètent et s'augmentent mutuellement. C'est en maîtrisant cette collaboration que l'industrie pourra véritablement atteindre les objectifs de l'Industrie 5.0 : une prospérité qui soit à la fois durable, résiliente et partagée, plaçant la technologie au service de l'humanité.

8.3. Perspectives : L'horizon de l'Industrie 6.0

Alors que l'Industrie 5.0 se déploie, axée sur la synergie homme-machine, les discussions prospectives dessinent déjà les contours de l'Industrie 6.0.⁸⁰ Bien que ce concept soit encore largement spéculatif, il converge vers une vision de systèmes industriels entièrement intelligents, autonomes et durables, dépassant largement les capacités actuelles.⁸⁰

La distinction fondamentale avec l'Industrie 5.0 réside dans le degré d'autonomie. Si l'Industrie 5.0 cherche à optimiser la collaboration entre l'humain et la machine⁸², l'Industrie 6.0 postule des systèmes intelligents capables de fonctionner avec une intervention humaine minimale, voire nulle.⁸¹ Dans ce paradigme, les capacités des machines pourraient rivaliser avec celles des humains, reléguant le rôle de ces derniers à la supervision stratégique et à la gouvernance, plutôt qu'au contrôle opérationnel.⁸⁰

Cette nouvelle ère s'appuierait sur une convergence de technologies de pointe :

- **Intelligence Artificielle et Robotique Avancée** : Des systèmes d'IA omniprésents et des robots capables de s'auto-organiser et de fonctionner de manière totalement autonome.⁸⁰

- **Informatique Quantique** : Le recours à la puissance de calcul quantique pour résoudre des problèmes d'optimisation et des algorithmes d'une complexité inaccessible aux ordinateurs classiques.⁸⁵
- **Interfaces Cerveau-Machine (ICM)** : Des technologies permettant un contrôle direct des machines par la pensée, instaurant une symbiose homme-machine inédite où l'humain assure un pilotage cognitif.⁸⁰
- **Biotechnologie et Nanotechnologie** : L'intégration de systèmes biologiques, comme la bio-fabrication où des matériaux sont "cultivés" plutôt qu'extraits, et l'utilisation de la nanotechnologie pour une précision matérielle sans précédent.⁸⁰

Au-delà de la technologie, l'Industrie 6.0 est définie par des objectifs sociétaux et environnementaux encore plus forts. La durabilité devient un pilier central, avec une exigence de transparence totale pour les usines "responsables" opérant au sein d'une économie circulaire et en harmonie avec les limites planétaires.⁸⁵

Cependant, cette vision soulève des défis considérables. La transition vers une hyper-automatisation nécessitera une profonde mutation des compétences de la main-d'œuvre, vers la pensée systémique, la résolution de problèmes créatifs et la gestion de processus complexes.⁸² De plus, l'autonomie quasi-totale des systèmes exigera des cadres de gouvernance et d'audit extrêmement robustes pour garantir la responsabilité, la transparence et l'alignement éthique des décisions prises par les machines.⁸²

Ouvrages cités

1. De l'industrie 4.0 à l'industrie 5.0 : quelles différences ? - ATOSS, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.atoss.fr/blog/industrie-4-0-vs-industrie-5-0-laspect-humain-au-coeur-des-activites>
2. [Livre blanc] Votre voyage vers l'Industrie 4.0 - Aegis Software, dernier accès : août 25, 2025, <https://info.aiscorp.com/fr/industry-4.0-journey>
3. Industrie 5.0 : vers un environnement industriel plus collaboratif - Mapex, dernier accès : août 25, 2025, <https://mapex.io/fr/news/industrie-5-0-vers-un-environnement-industriel-plus-collaboratif/>
4. [Livre blanc] Industrie 5.0 - Proaction International, dernier accès : août 25, 2025, <https://blog.proactioninternational.com/fr/industrie-5.0>
5. expertise.boschrexroth.fr, dernier accès : août 25, 2025, <https://expertise.boschrexroth.fr/8-questions-pour-comprendre-le-concept-industrie-5-0/#:~:text=Qu'est%20ce%20que%20l%2Cmission%20%C3%A0%20l%2C%C3%A9chelle%20soci%C3%A9tale.>
6. Industrie 5.0 : plus humaine, durable et résiliente - Mecalux.fr, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.mecalux.fr/blog/industrie-5-0>
7. Microservices et architecture monolithique | Atlassian, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.atlassian.com/fr/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith>
8. Monolithique et microservices : différence entre les architectures de développement logiciel, dernier accès : août 25, 2025, <https://aws.amazon.com/fr/compare/the-difference-between-monolithic-and-microservices-architecture/>
9. Architecture de microservices : définition, avantages et bonnes pratiques - GitLab, dernier accès : août 25, 2025, <https://about.gitlab.com/fr-fr/blog/what-are-the-benefits-of-a-microservices-architecture/>
10. Le rôle des passerelles d'API - Red Hat, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.redhat.com/fr/topics/api/what-does-an-api-gateway-do>
11. What Is an API Gateway? How It Works & Why You Need One - Solo.io, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.solo.io/topics/api-gateway>
12. API Gateway vs. API Management - API7.ai, dernier accès : août 25, 2025, <https://api7.ai/blog/api-gateway-and-api-management-comparison>
13. What is a data fabric? | SAP, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.sap.com/resources/what-is->

[data-fabric](#)

14. Augmented data management: Data fabric versus data mesh - IBM, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.ibm.com/think/topics/data-management-vs-data-fabric-vs-data-mesh>
15. What Is a Data Fabric? - IBM, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.ibm.com/think/topics/data-fabric>
16. État des lieux de l'industrie 4.0 - Roland Berger, dernier accès : août 25, 2025, https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/Roland_Berger_Industrie_4.0.pdf
17. ► How to Integrate Legacy Systems and Modern Software in 2025, dernier accès : août 25, 2025, <https://acropolium.com/blog/legacy-systems-integration/>
18. What's up with... DSP Leaders, Telstra, Spirent & Viavi - TelecomTV, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.telecomtv.com/content/digital-platforms-services/what-s-up-with-dsp-leaders-telstra-spirent-viavi-53136/>
19. An Experimental Protocol for Human Stress Investigation in Manufacturing Contexts: Its Application in the NO-STRESS Project - ResearchGate, dernier accès : août 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/373523460_An_Experimental_Protocol_for_Human_Stress_Investigation_in_Manufacturing_Contexts_Its_Application_in_the_NO-STRESS_Project
20. PeopleSoft CRM 9.2: Business Object Management - Oracle Help Center, dernier accès : août 25, 2025, https://docs.oracle.com/cd/F32212_01/psft/pdf/crm92cbom-b052020.pdf
21. Construire des espaces de données interopérables pour l'industrie du futur - STM Cairn.info, dernier accès : août 25, 2025, <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-4-page-104?lang=fr>
22. 5 ESG Projects to Build Using AI - Medium, dernier accès : août 25, 2025, <https://medium.com/projectpro/5-esg-projects-to-build-using-ai-f97f6b9f2bae>
23. Carbon Footprint Analytics with Microsoft Cloud for Sustainability: A Guide to Enhancing ESG Reporting Performance - ITMAGINATION, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.itmagination.com/blog/mastering-carbon-footprint-analytics-with-microsoft-cloud-for-sustainability-esg-performance>
24. Using AI for Carbon Footprint Tracking: How Supply Chains Can Meet Sustainability Goals, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.omdena.com/blog/using-ai-for-carbon-footprint-tracking-how-supply-chains-can-meet-sustainability-goals>
25. The 12 best carbon accounting software (July 2025) - PlanA.Earth, dernier accès : août 25, 2025, <https://plana.earth/academy/best-carbon-accounting-software-2023>
26. Climatiq - API for Carbon Footprint Calculations, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.climatiq.io/>
27. Définition Multi-Agent Systems - - Mohamed Zaraa, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.mohamed-zaraa.com/definition-multi-agent-systems/>
28. Système multi agents IA : comment ça marche ? - Algos, dernier accès : août 25, 2025, <https://algos-ai.com/systeme-multi-agents-ia/>
29. Conception d'un système multi-agents adaptatif pour la résolution ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://labstic.univ-guelma.dz/sites/labstic.univ-guelma.dz/files/These-Benhamza-Karima.pdf>
30. Systèmes multiagents : Principes généraux et applications - SI & Management, dernier accès : août 25, 2025, <http://www.sietmanagement.fr/wp-content/uploads/2017/12/Chaib-draa2001.pdf>
31. Chapitre II Systèmes Multi-Agents, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.mcours.net/cours/pdf/leilcllic3/leilcllic905.pdf>
32. Quelle est la différence entre l'automatisation intelligente (IA) et la RPA - Automation Anywhere, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.automationanywhere.com/fr/rpa/intelligent-automation-vs-rpa>
33. RPA et Agents IA : vers un nouveau standard de l'automatisation en ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://islean-consulting.fr/fr/transformation-digitale/agent-ia-rpa-automatisation/>

34. Agents IA vs RPA : quelle solution d'automatisation choisir ?, dernier accès : août 25, 2025, <https://agence-acoma.fr/agents-ia-vs-rpa-quelles-differences-pour-votre-entreprise/>
35. Qu'est-ce qu'un système multi-agent ? | SAP, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.sap.com/suisse/resources/what-are-multi-agent-systems>
36. (PDF) Les systemes multi-agents : un aperçu general - ResearchGate, dernier accès : août 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/242623967_Les_systemes_multi-agents_un_apercu_general
37. Multiagent Systems - UCF Department of Computer Science, dernier accès : août 25, 2025, <http://www.cs.ucf.edu/~gitars/cap6671-2009/Papers/sycara-mas.pdf>
38. Emergence in Multi-Agent Systems - AAAI, dernier accès : août 25, 2025, <https://cdn.aaai.org/ocs/18293/18293-78912-1-PB.pdf>
39. Modélisation multi-agents pour systèmes émergents et auto-organisés | Theses.fr, dernier accès : août 25, 2025, <https://theses.fr/2011TOU30290>
40. Emergent Behaviors in Multiagent Systems: Unexpected Patterns ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://www.gsdfs.com/post/emergent-behaviors-in-multiagent-systems-unexpected-patterns-and-theories-of-intelligence>
41. Systèmes d'IA multi-agents : Guide complet de l'intelligence collaborative - Latenode, dernier accès : août 25, 2025, <https://latenode.com/fr/blog/multi-agent-ai-systems-complete-guide-to-collaborative-intelligence>
42. Human in the loop : r/AI_Agents - Reddit, dernier accès : août 25, 2025, https://www.reddit.com/r/AI_Agents/comments/1iq757s/human_in_the_loop/
43. Ethical Considerations in Deploying Autonomous AI Agents - Auxiliobits, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.auxiliobits.com/blog/ethical-considerations-when-deploying-autonomous-agents/>
44. Anyone building agent systems with human-in-the-loop escalation logic? - Reddit, dernier accès : août 25, 2025, https://www.reddit.com/r/AI_Agents/comments/1m5q6h1/anyone_building_agent_systems_with_humanintheloop/
45. Implement human-in-the-loop confirmation with Amazon Bedrock Agents - AWS, dernier accès : août 25, 2025, <https://aws.amazon.com/blogs/machine-learning/implement-human-in-the-loop-confirmation-with-amazon-bedrock-agents/>
46. wjayesh/mahilo: mahilo: Multi-Agent Human-in-the-Loop Framework is a flexible framework for creating multi-agent systems that can each interact with humans while sharing relevant context internally. - GitHub, dernier accès : août 25, 2025, <https://github.com/wjayesh/mahilo>
47. Réorganisation et auto-organisation dans les systèmes multi-agents - CORE, dernier accès : août 25, 2025, <https://core.ac.uk/download/pdf/52620867.pdf>
48. Beyond Detection: A Multi-Agent Framework for Root Cause Analysis of Financial Discrepancies in Distributed Environments - Amazon Science, dernier accès : août 25, 2025, <https://assets.amazon.science/69/cb/d93876ef4ce5b8c2a2a07087b261/beyond-detection-a-multi-agent-framework-for-root-cause-analysis-of-financial-discrepancies-in-distributed-environment.pdf>
49. Catch Me If You Can: A Multi-Agent Framework for Financial Fraud ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://medium.com/@mariaprokofieva/catch-me-if-you-can-a-multi-agent-framework-for-financial-fraud-detection-03faa7caba7c>
50. Deploy a multi-agent AI fraud detection system on OCI - Oracle Help Center, dernier accès : août 25, 2025, <https://docs.oracle.com/en/solutions/ai-fraud-detection/index.html>
51. Multi-Agent System Patterns in Financial Services: Architectures for Next-Generation AI Solutions | AWS Builder Center, dernier accès : août 25, 2025, <https://builder.aws.com/content/2uDxjoo105xRO6Q7mfkogmOYTVp/multi-agent-system-patterns-in->
52. Multi-Agent System for Flawless Financial Compliance - Akira AI, dernier accès : août 25, 2025,

<https://www.akira.ai/blog/multi-agent-system-for-financial-compliance>

53. Qu'est-ce qu'un système multi-agents ? Types, applications et ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://www.astera.com/fr/type/blog/multi-agent-system/>
54. Qu'est-ce qu'un système multi-agents - IBM, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.ibm.com/fr-fr/think/topics/multiagent-system>
55. IA agentique : Multi-agents IA, l'intelligence collaborative qui ... - Talan, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.talan.com/global/fr/ia-agentique-multi-agents-ia-lintelligence-collaborative-qui-transforme-lentreprise>
56. A reference architecture model for industry 5.0 (RAMI 5.0). - ResearchGate, dernier accès : août 25, 2025, https://www.researchgate.net/figure/A-reference-architecture-model-for-industry-50-RAMI-50_fig9_364934137
57. Full article: Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2022.2138611>
58. Human-Centric Artificial Intelligence Architecture for Industry 5.0 Applications - arXiv, dernier accès : août 25, 2025, <https://arxiv.org/abs/2203.10794>
59. L'importance des Ontologies dans le Web Sémantique - W3r.one ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://w3r.one/fr/blog/web/web-semanatique-intelligence-artificielle/fondamentaux-web-semantique/importance-ontologies-web-semantique>
60. Les ontologies informatiques au service de la communication interdisciplinaire : l'interopérabilité sémantique - Revue Intelligibilité du Numérique, dernier accès : août 25, 2025, <https://intelligibilite-numerique.numerev.com/numeros/n-1-2020/12-les-ontologies-informatiques-au-service-de-la-communication-interdisciplinaire-l-interoperabilite-semantique>
61. Réutilisation des ontologies pour l'interopérabilité sémantique et impact de l'IA générative., dernier accès : août 25, 2025, <https://theses.fr/s401145>
62. Internet industriel des objets et technologies avancées : les leviers d'une transformation digitale réussie - McKinsey, dernier accès : août 25, 2025, https://www.mckinsey.com/fr/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/france/our%20insights/internet%20industriel%20des%20objets%20et%20technologies%20avancees/iiot_rapport_mars%202022.pdf?teport/industrial-iiot-market
63. Qu'est-ce que la gouvernance des API ? | IBM, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.ibm.com/fr-fr/think/topics/api-governance>
64. Gouvernance de l'API : Stratégies et idées clés - SnapLogic, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.snaplogic.com/fr/glossary/api-governance>
65. Meilleures pratiques pour la gouvernance des API | F5, dernier accès : août 25, 2025, https://www.f5.com/fr_fr/company/blog/api-governance-best-practices-and-management
66. AI Agent Governance - Reply, dernier accès : août 25, 2025, <https://dam-media.reply.com/production/10/10/2a67c411-b48d-9476-fcb5-bb9fde114cf8/cfa8b04f-61b0-4d0e-9755-530acbb48e6d.pdf>
67. Agent Lifecycle & Governance for Autonomous AI | Agilisium, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.agilisium.com/agent-ai-solutions/agent-lifecycle-and-governance>
68. Effective governance frameworks for AI agents - IBM Developer, dernier accès : août 25, 2025, <https://developer.ibm.com/articles/governing-ai-agents-watsonx-governance/>
69. Principles of Agentic AI Governance in 2025: Key Frameworks and Why They Matter Now, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.arionresearch.com/blog/g9jiv24e3058xsivw6dig7h6py7wml>
70. API Management -Gestion des API : définition, démarche, solutions - Blueway, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.blueway.fr/enjeux/api-management>
71. Framework for Governed Orchestration and Adaptive Lifecycle Management of Hierarchical Artificial

- Intelligence Agents - Technical Disclosure Commons, dernier accès : août 25, 2025, https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=9676&context=dpubs_series
72. Designing Multi-Agent Intelligence - Microsoft for Developers, dernier accès : août 25, 2025, <https://devblogs.microsoft.com/blog/designing-multi-agent-intelligence>
73. Streamlining Production with Multi-Agent Systems - Number Analytics, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/streamlining-production-multi-agent-systems>
74. Les promesses et les risques des systèmes multi-agents - F5, dernier accès : août 25, 2025, https://www.f5.com/fr_fr/company/blog/multi-agent-systems-for-agentic-ai
75. Multi-agent Systems in Finance: Enhancing Decision-Making and Market Analysis, dernier accès : août 25, 2025, <https://smythos.com/developers/agent-development/multi-agent-systems-in-finance/>
76. Multi-agent Systems vs. Distributed Systems: Key Differences and Applications - SmythOS, dernier accès : août 25, 2025, <https://smythos.com/developers/agent-development/multi-agent-systems-vs-distributed-systems/>
77. (PDF) Ethical Considerations in AI Decision-Making - ResearchGate, dernier accès : août 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/389880492_Ethical_Considerations_in_AI_Decision-Making
78. The ethics of artificial intelligence: Issues and initiatives - European Parliament, dernier accès : août 25, 2025, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/634452/EPRS_STU\(2020\)634452_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/634452/EPRS_STU(2020)634452_EN.pdf)
79. Ethical Considerations in AI Agent Development: Ensuring Responsible AI - Medium, dernier accès : août 25, 2025, <https://medium.com/@sparkoutdigitalmarketing/ethical-considerations-in-ai-agent-development-ensuring-responsible-ai-74f637ceff9b>
80. From Industry 4.0 to Industry 6.0: Tracing the Evolution of Industrial ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://www.mdpi.com/2079-8954/13/5/387>
81. How smart technologies are driving industry 6.0 and beyond | UBS Global, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.ubs.com/global/en/investment-bank/insights-and-data/2023/technology-driving-industry-6.html>
82. Looking Ahead to Industry 6.0: What Does It Promise for Manufacturing?, dernier accès : août 25, 2025, <https://emag.directindustry.com/2025/02/18/looking-ahead-to-industry-6-0-what-does-it-promise-for-manufacturing/>
83. What Is Industry 5.0 - EAMVision, dernier accès : août 25, 2025, <https://eamvision.com/what-is-industry-5-0/>
84. www.ubs.com, dernier accès : août 25, 2025, <https://www.ubs.com/global/en/investment-bank/insights-and-data/2023/technology-driving-industry-6.html#:~:text=Industry%205.0%20emerged%20as%20a,little%20need%20for%20human%20interventio>
[n.](https://www.ubs.com/global/en/investment-bank/insights-and-data/2023/technology-driving-industry-6.html#:~:text=Industry%205.0%20emerged%20as%20a,little%20need%20for%20human%20interventio)
85. Industry 6.0: How the Next Industrial Revolution Will Reshape ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://www.automation.com/en-us/articles/april-2025/industry-6-industrial-revolution-manufacturing>
86. (PDF) Industry 6.0 as an Emerging Field of Research: A Systematic and Bibliometric Analysis - ResearchGate, dernier accès : août 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/387873513_Industry_6_0_as_an_Emerging_Field_of_Research_A_Systematic_and_Bibliometric_Analysis
87. Sustainability of Industry 6.0 in Global Perspective: Benefits and ..., dernier accès : août 25, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8905282/>
88. Industry 6.0 - Universal Risk, dernier accès : août 25, 2025, <https://universalrisk.org/creative-collaborations/industry-6-0-2/>
89. Industry 6.0 and Their Implementation in AEC Sector - Encyclopedia.pub, dernier accès : août 25, 2025, <https://encyclopedia.pub/entry/49363>