

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**GESTION DES ACTIFS ET DU CYCLE DE VIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION,
TRANSPORT ET DISTRIBUTION ÉLECTRIQUES : COMPARAISON DE MODÈLES**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA**

**MAÎTRISE EN INGÉNIERIE
(CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL)**

**PAR
Guy Albert Landry YAKANA**

JUIN 2025

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE – CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL
(M. SC. A.)

Ce mémoire a été dirigé par :

Georges Abdul-Nour, directeur de recherche, Ph. D.

UQTR

Dragan Komljenovic, codirecteur de recherche, Ph. D.

Hydro-Québec

Jury d'évaluation du mémoire :

Georges Abdul-Nour, Ph. D.

Directeur de recherche, UQTR

Walid Ghié, Ph. D.

Membre externe, UQAT

Miguel Diago Martinez, Ph. D.

Membre, IREQ/HQ Varenne

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier DIEU, qui a permis ce parcours, et suscité toutes les personnes citées ici et ayant contribué à mes études et à ce travail; ma reconnaissance va à l'endroit de ma grande famille pour son soutien constant.

Mes sincères remerciements, je les adresse à Monsieur Georges Abdul-NOUR, mon directeur de recherche, pour son engagement, son soutien, son encadrement et son appui dans mon cheminement et à travers la Chaire Hydro-Québec en termes de bourses.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Dragan Komljenovic, mon codirecteur, pour sa contribution sur le plan académique et l'orientation de la recherche.

Ma reconnaissance est exprimée envers Monsieur MBAREK, pour son assistance sur le plan de la recherche et de la publication.

Ma gratitude est soulignée envers Mesdames Chantal Baril, Cynthia Scott, Saray Moreira Urra, Marie-France Bolduc, Marie-Claude Brûlé, Messieurs François Gauthier, Pascal Forget, Adel Omar Dahmane, Adel Badri, représentant différents comités de programmes, services, décanat aux études, ou organismes subventionnaires de bourses à l'UQTR, le personnel de la bibliothèque, pour leurs contributions et interventions appréciables.

Enfin, que tous les collègues étudiants, le Groupe Biblique Universitaire, le Bon Camarade et l'AGEUQTR trouvent ici l'expression de mon sentiment distingué pour leur soutien multiforme.

RÉSUMÉ

Les organisations de divers secteurs (production, énergie, mines, infrastructures publiques, etc.), qui exploitent des actifs physiques pour produire des biens et des services, font face à des difficultés (concurrence, vieillissement des actifs, etc.) et à la pression de leur environnement opérationnel et des affaires pour la rentabilité et le développement durable.

La gestion des actifs (GDA) doit considérer le contexte de ces organisations évoluant dans un environnement caractérisé par de multiples complexités et risques, et permettre d'atteindre leurs objectifs de façon optimale. Cette gestion intègre la vie entière des actifs physiques pour la prise de décision, et constitue une approche alternative, non limitée à la maintenance ou la fiabilité. Les difficultés rencontrées, l'émergence de nouveaux modèles, des industries 4.0 et 5.0 à la fois opportunes pour renforcer la GDA et perturbatrices (ajout à la pression et à la complexité, changements de paradigmes), conduisent à questionner la conceptualisation en GDA. Cette problématique intéresse la chaire de recherche d'Hydro-Québec dont l'enjeu principal porte sur une approche globale des concepts. Les modèles de haut niveau de GDA concernés dans ce cadre constituent un des leviers visant la création de la valeur, puis devant favoriser l'opérationnalisation, notamment en maintenance des systèmes techniques.

Cette recherche vise à examiner la pertinence et la finalité de divers modèles conceptuels permettant l'évaluation de la GDA, dans leur contribution à la valeur et dans l'avancement de cette discipline, en mettant l'accent sur les aspects structurants (contexte de l'organisation, concepts de cycle de vie, risques, etc.). Une analyse comparative de modèles de divers secteurs est effectuée dans cette perspective, et conduit à formuler des critères et des conditions d'un cadre de conceptualisation en GDA, déterminant l'adoption (ou l'adaptation) des modèles conceptuels qui satisfont aux résultats attendus.

Mots-clés : gestion d'actifs, cycle de vie, systèmes techniques, modèles conceptuels, industrie 4.0, industrie 5.0.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	x
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 - CONTEXTE DE LA RECHERCHE	5
<i>1.1 - Problématique</i>	<i>5</i>
<i>1.2 - Questions de recherche</i>	<i>8</i>
<i>1.3 - Objectifs de la recherche</i>	<i>10</i>
<i>1.4 - Enjeux de la conceptualisation en GDA</i>	<i>11</i>
CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE	13
<i>2.1 - Définitions des principaux concepts</i>	<i>13</i>
<i>2.1.1 - Concept de gestion d'actifs</i>	<i>13</i>
<i>2.1.2 - Concept et principes de l'Industrie 4.0.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.3 - Industrie 5.0 : complément de l'Industrie 4.0</i>	<i>24</i>
<i>2.2 - Présentation des modèles conceptuels.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.1 - Principaux modèles conceptuels de GDA</i>	<i>25</i>
<i>2.2.2 - Modèles appliqués dans différents secteurs</i>	<i>39</i>
<i>2.2.3 - Les aspects méthodologiques.....</i>	<i>42</i>
<i>2.2.4 - Implications de l'industrie 4.0 et de l'industrie 5.0</i>	<i>55</i>
<i>2.3 - Synthèse de revue de littérature.....</i>	<i>63</i>
<i>2.3.1 - Matrice de revue de littérature</i>	<i>64</i>
<i>2.3.2 - Diagramme d'Ishikawa</i>	<i>64</i>

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE.....	66
3.1 - <i>Cadre conceptuel</i>	66
3.2 - <i>Étapes de la méthodologie</i>	67
3.2.1 - Méthode de recherche	67
3.2.2 - Technique de collecte des données	68
3.2.3 - Mode d'investigation.....	71
CHAPITRE 4 - ANALYSE DES MODÈLES CONCEPTUELS.....	73
4.1 - <i>Contexte de l'organisation en GDA</i>	73
4.2 - <i>Apport des acteurs de la GDA</i>	79
4.3 - <i>Démarcation ou spécificités du secteur de l'électricité</i>	82
4.3.1 - Caractéristiques du secteur de l'électricité	82
4.3.2 - Impact de l'I4.0 dans le secteur de l'électricité	85
4.4 - <i>Apprentissage</i>	86
CHAPITRE 5 - RÉSULTATS ET DISCUSSION	94
5.1 - <i>Modèle mental ou point de départ de la conceptualisation en GDA</i>	94
5.2 - <i>Intégration Personnes, Processus, et Technologie</i>	95
5.3 - <i>Visibilité et cohérence des éléments du contexte de l'organisation en GDA</i>	97
5.4 - <i>Apport des acteurs : validation des modèles conceptuels et réduction de l'écart entre la recherche et la pratique</i>	99
5.5 - <i>Spécificités du secteur de l'électricité : entre équilibre et objectif global en GDA</i>	100
5.6 - <i>Apprentissage : anticipation et intervention dans le cours du changement</i>	101
CONCLUSION.....	107
LISTE DES RÉFÉRENCES	109
ANNEXE A - Matrice de revue de littérature.....	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Principaux modèles de GDA	37
Tableau 2-2 : Principaux modèles de GDA (suite 1)	38
Tableau 2-3 : Convergence des modèles conceptuels en GDA	47
Tableau 3-1 : Liste des documents : auteur(s), année et secteur(s).....	70
Tableau 4-1 : Répartition des documents selon les éléments du contexte et les secteurs	75
Tableau 4-2 : Répartition des documents par secteurs et catégories d'acteurs	80
Tableau 4-3 : Répartition des documents par secteurs et cadre de collaboration	80
Tableau 4-4 : Aspects de la GDA et des risques pour le secteur électricité.....	84
Tableau 4-5 : Aspects liés à l'apprentissage dans le secteur de l'électricité.....	91

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Accent et contexte du PAS des actifs physiques par rapport aux autres catégories d'actifs (BSI, 2008a)	15
Figure 2-2 : Relation entre les termes clés de la gestion d'actifs (ISO, 2024a)	17
Figure 2-3 : Modèle conceptuel de GDA (IAM, 2015)	20
Figure 2-4 : 9 Technologies qui transforment l'industrie (Silva et al., 2020)	23
Figure 2-5 : Principales exigences d'un système de GDA (ISO, 2024b)	26
Figure 2-6 : Processus de GDA adapté des exigences de GDA de l'ISO (2024b)	26
Figure 2-7 : Modèle de concept de GDA (AMC, 2014)	27
Figure 2-8 : Cadre d'entreprise (Brown & Humphrey, 2005)	28
Figure 2-9 : Modèle organisationnel pour les infrastructures (CIGRÉ, 2010)	29
Figure 2-10 : Modèle de GDA de livraison d'énergie (EPRI, 2020)	31
Figure 2-11 : Cadre de GDA stratégique intégrée (AAMCoG, 2012)	33
Figure 2-12 : Modèle de capacités à 10 boîtes de l'IAM (IAM, 2024)	34
Figure 2-13: Diagramme de processus de l'IIMM (IPWEA, 2020)	35
Figure 2-14 : Système de support de la GDA basé sur l'IA (Mattioli et al., 2020)	41
Figure 2-15 : Cadre de maintenance basée sur une stratégie de GDA (Moradkhani et al., 2014)	44
Figure 2-16 : Dimensions ou sous-systèmes sociotechniques(Kaminski, 2022)	51
Figure 2-17 : Compétitivité (Pellerin et al., 2019)	52
Figure 2-18 : Agilité (Pellerin et al., 2019)	52
Figure 2-19 : Synthèse des aspects de la complexité	53
Figure 2-20 : Panorama stratégique de l'Industrie 4.0 (Sjøbakk, 2018)	56
Figure 2-21 : Synthèse sur les organisations modernes en GDA dans l'industrie	63
Figure 2-22 : Diagramme d'Ishikawa	65
Figure 3-1 : Modèle de recherche	66
Figure 4-1 : Données (synthèse) des éléments du contexte	76
Figure 5-1 : Cadre de la conceptualisation en GDA	105

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AAMCoG	Australian Asset Management Collaborative Group
AMC	Asset Management Council
BDA	Big Data Analytics
BSI	The British Standards Institution
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux d'Électricité
EPRI	Electric Power Research Institute
ÉREs	Évènements rares et extrêmes
FCM	Federation of Canadian Municipalities
GDA	Gestion D'Actifs
GDAP	Gestion D'Actifs Physiques
GFMAM	The Global Forum on Maintenance and Asset Management
I4.0 / I5.0	Industrie 4.0 / Industrie 5.0
IA	Intelligence Artificielle
IAM	The Institute of Asset Management
IIMM	International Infrastructure Management Manual
IoT/ IIoT	Internet of Things / Industrial Internet of Things
IPWEA	Institute of Public Works Engineering Australasia
ISO	International Organization for Standardization
ML	Machine Learning
PDAM	Power Delivery Asset Management
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PP	Parties prenantes
PTDEs	Production, Transport et Distribution Électriques
RBAM	Risk-Based Asset Management
RIAM	Risk Informed Asset Management
RIDM	Risk Informed Decision-Making
SACs	Systèmes adaptatifs complexes
SCP	Systèmes cyber-physiques (Cyber-Physical Systems [CPS])
SdP	Science des processus
SGDA	Système de Gestion D'Actifs
SST	Santé et Sécurité du Travail
TS	Théorie sociotechnique
UIC	International Union of Railways
VICA	Volatile, incertain, complexe et ambigu

INTRODUCTION

Les entreprises ou organisations de différents secteurs (production, infrastructures publiques, mines, énergie, etc.) exploitent des actifs physiques à forte intensité de capital, pour produire de manière fiable, profitable et sûre, des biens et des services, afin de satisfaire à la demande et faire face à la concurrence. À ces deux principales difficultés, s'ajoutent la dérégulation (Khuntia et al., 2016), le vieillissement de ces actifs, la rareté des ressources (Brown & Humphrey, 2005; Komljenovic et al., 2015; Roda & Macchi, 2018), les aspects sécuritaires (Lemerande, 2018), les impacts sociaux ou environnementaux (Germán et al., 2014; Khuntia et al., 2016; Komljenovic et al., 2016), etc. La nécessité de mieux gérer ces actifs et les préserver par la maintenance, d'assurer la continuité du service, et de garantir la rentabilité et le développement durable s'impose, afin de surmonter la pression provenant de l'environnement de ces organisations (Australian Asset Management Collaborative Group [AAMCoG], 2012; Parlikad, 2019).

Cet environnement « opérationnel et des affaires » comporte de multiples complexités (actifs physiques, systèmes et dépendances, marchés et technologies associées, nombreux acteurs et facteurs d'influence, diverses interactions sur le plan politique, socioéconomique, environnemental, légal, etc.) et incertitudes (Komljenovic et al., 2016). Des changements d'interactions, du climat (Bale et al., 2015), et divers types de risques (Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; Parlikad, 2019) y sont impliqués également. Cette situation révèle l'existence de conflits d'intérêts, et comprend des enjeux pour le développement de stratégies et la prise de décision, conduisant à qualifier « les entreprises contemporaines de systèmes adaptatifs complexes », dont la gestion nécessite des approches cohérentes (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2019). Ces approches doivent englober tous les éléments et toutes les informations (historiques, et en temps réel) liés à la vie entière des actifs (The Institute of Asset Management [IAM], 2015; Komljenovic et al., 2016; Parlikad, 2019), ainsi que des processus d'apprentissage et d'adaptation (Bale et al., 2015), utiles pour la prise de décision.

La gestion des actifs [GDA] constitue une approche alternative visant à considérer le contexte d'une organisation, pour atteindre ses objectifs (Brown & Humphrey, 2005; IAM, 2015; Khuntia et al., 2016; Konstantakos et al., 2019; Vahedi & Movahedi, 2018). Ce contexte peut être caractérisé par la criticité et les défis (en termes d'échelle et de complexité) de la gestion optimale des actifs physiques, des contraintes ou opportunités (liées à la volatilité de l'environnement des affaires) de cette gestion incorporant la vie entière de ces actifs. L'aspect optimal se réfère au processus prescrivant de faire un meilleur compromis de la valeur entre plusieurs facteurs concurrents (qualitatifs, quantitatifs) en considérant l'interaction des activités du cycle de vie des actifs lors de la prise de décision (IAM, 2015). Ce cycle peut parfois impacter celui du service (exemple de l'électricité) ou produit fourni par l'organisation (Komljenovic et al., 2015; Lima & Costa, 2019). Pour réaliser la valeur, cette approche de GDA multidisciplinaire doit organiser un ensemble de savoirs, en se servant de modèles conceptuels décrivant des systèmes d'évaluation des actions ou des décisions avec leurs impacts (Vahedi & Movahedi, 2018). Ces modèles, tout comme les développements technologiques ou méthodologiques, la mutualisation des compétences de divers acteurs ou parties prenantes [PP], les investissements, etc. sont autant de leviers ou d'options pouvant contribuer à une gestion optimale selon le phénomène analysé (Bosisio et al., 2019; Brown & Humphrey, 2005; Malcón et al., 2015; Mattioli et al., 2020; Seow et al., 2016). Pour la chaire de recherche Hydro-Québec, la GDA basée sur une approche globale, qui diffère des traditionnelles en silos, représente un avantage (Abdul-Nour et al., 2021). Son renforcement est nécessaire pour profiter des opportunités liées à ses différents aspects et à la complexité.

L'Industrie 4.0 [I4.0] est une de ces opportunités, et concerne des aspects similaires à ceux de la GDA (multidisciplinarité, cycle de vie, chaîne de valeur, etc.). Son avènement impose de nouveaux paradigmes (utilisation des nouvelles technologies, information en temps réel, connectivité, intelligence, etc.) et une certaine pression (acquisition des nouvelles technologies, employabilité, la santé et la sécurité au travail [SST], etc.) liée à l'adaptation de l'humain à un nouvel environnement numérique (Liboni et al., 2018;

Silvestri et al., 2020). L'I4.0 constitue à ce titre une révolution industrielle ayant des implications en GDA, et notamment sur les modèles conceptuels (Biard & Nour, 2021; Mattioli et al., 2020). Cette initiative est ensuite complétée par une autre, l'Industrie 5.0 [I5.0] également opportune en prônant l'adaptation à l'humain d'une technologie étendue pour laquelle la recherche est mobilisée en faveur du progrès sociétal par l'industrie, et qui vise la création de la valeur pour toutes les PP (Xu et al., 2021), dont les besoins et les attentes sont un enjeu pour la GDA.

Cette recherche se penche sur la problématique de la conceptualisation en GDA, compte tenu des observations faites sur de nombreux modèles conceptuels, du besoin de standards appropriés visant de bonnes pratiques, et du caractère à la fois opportuniste et perturbateur du changement introduit par l'I4.0 et l'I5.0 (nouvelles technologies et compétitivité, adaptation des compétences, nouveaux modèles des affaires, etc.). Pour y parvenir, cette recherche examine la pertinence et la finalité de ces modèles à partir des concepts et des apports divers de la littérature, en insistant sur certains aspects structurants de la GDA en rapport avec l'I4.0 et l'I5.0 (Liboni et al., 2018; Lima & Costa, 2019; Xu et al., 2021)

Ainsi, le chapitre 1 présente le contexte de la recherche en rapport avec la problématique posée et les objectifs poursuivis. Le chapitre 2, consacré à la revue systématique de la littérature (articles, standards, guides, livres blancs, etc.), clarifie les concepts de GDA, de l'I4.0 et de l'I5.0, présente une certaine classification des modèles conceptuels, et ensuite décrit l'incidence des développements récents (normes de l'Organisation internationale de normalisation - The International Organization for Standardization [ISO] 5500X, complexité, théorie des organisations, I4.0, I5.0) sur ces modèles. La méthodologie décrite au chapitre 3 est axée sur une recherche exploratoire et une analyse documentaire, car aucune étude ou théorie n'existe sur la problématique soulevée. Une analyse critique et comparative des modèles conceptuels faisant l'objet du chapitre 4 permet d'apporter des réponses aux questions suscitées par cette problématique. Le chapitre 5 propose une discussion sur la conceptualisation en GDA sous l'I4.0 et l'I5.0, avant la conclusion indiquant quelques perspectives.

La contribution de cette recherche consiste à fournir un ensemble de critères et de conditions constituant un cadre de conceptualisation pour bâtir ou ajuster des éléments essentiels de la GDA, afin d'adopter (ou d'adapter) des modèles conceptuels satisfaisant aux résultats ou au contexte des organisations, en considérant ses enjeux de compréhension et de communication, de prise en compte globale des concepts associés, et d'évaluation en GDA. Cette contribution va favoriser des analyses ultérieures concernant la problématique posée, qui fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 1 - CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Ce chapitre situe l'orientation de cette recherche, notamment la problématique en rapport avec la perception, ou plus généralement la façon de penser des acteurs à propos de l'organisation (compréhension, concepts, contexte, structure, relations, etc.) dans le domaine de la gestion des actifs physiques qui se reflète dans les modèles conceptuels.

1.1 - Problématique

La GDA englobe plusieurs concepts (performance, risque et résilience, durabilité, économie circulaire, etc.), interreliés et incluant le cycle de vie des actifs physiques, pour réaliser la valeur (Abdul-Nour et al., 2021; IAM, 2024). Ce cycle de vie fait appel à la contribution de plusieurs disciplines telles que l'ingénierie de la fiabilité, la maintenance, et la gestion des actifs physiques en rapport avec d'autres types d'actifs, pour relayer des données et informations pertinentes. Des activités diverses, plus particulièrement en maintenance (en termes de surveillance, de prévention ou de réparation), et leurs impacts y sont impliqués (Crespo Márquez et al., 2020), ainsi que des décisions optimales selon diverses échelles de temps (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Khuntia et al., 2016). La perception de la GDA (définitions ou terminologie, rôles et responsabilités, défis, nature des actifs physiques, héritages ou arrière-plan, pratiques, niveaux ou intérêts de la recherche, etc.) se reflète dans les modèles conceptuels de divers secteurs et leurs acteurs (Benade, 2015; Brown et al., 2014; Global Forum on Maintenance and Asset Management [GFMAM], 2014; Komljenovic et al., 2016; Too, 2012), évoluant dans un environnement dynamique.

Cependant, les différents acteurs de GDA sont à la recherche d'un consensus sur des normes pour favoriser les échanges entre eux, afin d'aborder un tel environnement et les difficultés rencontrées, pouvant être renforcées par la terminologie diverse (Konstantakos et al., 2019; Too, 2012). Certains acteurs évoquent l'approche non rigoureuse des risques (probabilité et sévérité d'évènement redouté versus non-atteinte des performances cibles avec une tolérance), les surprises et les incidents perturbateurs, une profitabilité pas évidente, une non-satisfaction de la demande, etc. (Brown & Humphrey, 2005; IAM,

2015; Komljenovic & Abdul-Nour, 2015; Suakanto et al., 2021). D'autres acteurs relèvent la négligence des facteurs contextuels par de précédents modèles et les recherches (faisant une distinction entre systèmes réels et fictifs) défavorisant ainsi l'opérationnalisation (Bara et al., 2021; Laue et al., 2014), la fragmentation des activités (El-Akruti & Dwight, 2013) ou celle du corps des connaissances, et les décisions non structurées des praticiens (Roda & Macchi, 2018; Too, 2012). Un aspect de cette fragmentation touche particulièrement la maintenance, longtemps perçue comme un mal nécessaire (Too, 2012), n'étant qu'une des phases du cycle de vie d'un actif physique (Benade, 2015), ou un centre de coût inévitable, et devenu complexe par la prise en charge d'actifs physiques critiques et complexes (Ouertani et al., 2008; Silvestri et al., 2020). La disponibilité des ressources pour ses activités ou ses processus de modélisation ou d'intégration de nouvelles méthodes, de planification optimale (durée et coût, extension de la durée de vie des actifs, risques d'interruptions du service ou impacts), est conditionnée par sa contribution à la valeur (Khuntia et al., 2016; Komljenovic et al., 2016; Ouertani et al., 2008). Pour adresser la fragmentation, la chaire de recherche Hydro-Québec indique que la GDA est profitable à partir d'un cadre d'intégration de la planification, l'utilisation, et la durabilité des actifs physiques. Ses réflexions dans ce cadre rejoignent celles du secteur de l'électricité, tout en les abordant avec une perspective globale de tous les concepts associés (Abdul-Nour et al., 2021; Gaha et al., 2021). Les questions ou préoccupations suscitées par ces constats désignent la GDA comme une discipline capable d'apporter des réponses en utilisant ses modèles conceptuels comme leviers (Brown & Humphrey, 2005; Konstantakos et al., 2019; Too, 2012).

De plus, la GDA doit se confronter à l'émergence de nouveaux modèles d'affaires et des technologies due à l'Industrie 4.0 (Biard & Nour, 2021; Sjøbakk, 2018). Cette initiative constitue une opportunité, tout en ajoutant à la pression et à la complexité de l'environnement (Parlikad, 2019; Silvestri et al., 2020), pour des résultats avérés (Amelete et al., 2021; Rojko, 2017) grâce à l'information fournie en temps réel. Des changements indispensables introduits par l'I4.0 imposent le choix d'une GDA transversale, intelligente, utilisant les concepts fondamentaux de l'Internet des Objets (Internet of

Things [IoT]) et des systèmes cyber-physiques [SCP] (Biard & Nour, 2021; El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Rojko, 2017). Ces concepts qui permettent de collecter des données massives actionnées par l'intelligence artificielle [IA] ou l'apprentissage automatique (Machine Learning [ML]), dans l'opérationnalisation, doivent être intégrés dans une approche stratégique envisagée par la GDA. Complétant l'initiative précédente axée sur le développement technologique, l'I5.0 est plutôt axée sur la valeur (Xu et al., 2021), dont la réalisation est primordiale pour la GDA (Crespo Márquez et al., 2020; ISO, 2024a), et se caractérise par une approche systémique favorisant l'innovation technologique au profit de toute la société, et sociotechnique remettant l'humain au centre des processus industriels (Xu et al., 2021).

La conceptualisation en GDA, au cœur de cette problématique encore non adressée dans la littérature, est traduite par des modèles de haut niveau (niveau stratégique) illustrant une façon de penser ou une idée de l'organisation, par différents acteurs dans un rôle majeur offrant des opportunités. Cette façon de penser doit être en relation avec des théories vérifiables pour cette discipline évolutive (Konstantakos et al., 2019), abordant des systèmes complexes (Asset Management Council [AMC], 2014; Roda et al., 2016; Too, 2012), afin d'élaborer un modèle pertinent. La conceptualisation est importante, faisant partie d'une démarche qui conduit à l'opérationnalisation (phase pratique), et conditionne sa réussite, notamment à différents niveaux organisationnels (Laue et al., 2014) ou échelles de temps (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Khuntia et al., 2016). Cette démarche implique plusieurs facteurs contextuels, ainsi que les acteurs de la GDA qui sont interpellés en faveur de la validation des modèles (Parlikad, 2019), qui peuvent impacter les résultats attendus ou les objectifs visés par les organisations et contribuer ou non à l'avancement de la discipline. La problématique soulignée constitue un intérêt particulier pour la chaire de recherche d'Hydro-Québec. Ses activités en GDA doivent s'appuyer sur un cadre intégré qui sert de guide pour une stratégie ou un processus optimal dont l'enjeu premier est une approche globale. L'objectif est de parvenir à développer des

modèles génériques adaptés à son contexte et transférables à d'autres utilités du secteur de l'électricité (Abdul-Nour et al., 2021).

Les observations précédentes suscitent plusieurs questions faisant l'objet de cette recherche. L'intérêt est d'explorer des modèles conceptuels, de les examiner et de relever des aspects (concepts et théories, facteurs, ou critères, etc.) qui peuvent affecter de manière considérable la façon de penser des acteurs au sujet de l'organisation, sachant « *qu'il n'existe pas de modèle unique pour décrire la gestion d'actifs* » (IAM, 2024). Ces aspects doivent permettre d'adopter des modèles conceptuels satisfaisants (existants ou à élaborer), en tenant compte des divers changements et de plusieurs enjeux dans l'environnement opérationnel et des affaires.

1.2 - Questions de recherche

La principale question est la suivante : dans quelle mesure les modèles conceptuels de GDA sont-ils en adéquation avec les préoccupations ou les défis des organisations modernes?

Dans le but de répondre à la question principale, cette recherche aborde plusieurs questions secondaires.

La compréhension du contexte d'une organisation, notamment en intégration verticale ou en réseaux (Fulconis et al., 2014), est importante pour atteindre ses objectifs (IAM, 2024; ISO, 2024b), dans le souci de déterminer ou prendre en compte tous les facteurs contextuels intervenants dans la conceptualisation, et dont la négligence défavorise l'opérationnalisation (Laue et al., 2014). Ainsi, la première question provient de la façon de penser que ces modèles de haut niveau doivent intégrer dès le départ en considérant des éléments fondamentaux de manière éclairée (Crespo Márquez et al., 2020).

Question 1 : Comment est traduit le contexte de l'organisation en GDA à travers les modèles conceptuels ?

Diverses contributions en GDA (dues aux expériences, aux interprétations ou lacunes observées, etc.) dans le contexte d'une ou de plusieurs organisations (El-Akruti et al.,

2018; Too, 2012), et le nombre important de modèles proposés par divers acteurs nécessitent d'apprécier leur apport dans la conceptualisation, alliant la faisabilité (interdisciplinaire) et la validation des théories (Brown et al., 2014; El-Akruti et al., 2018; Roda & Macchi, 2018). Le rôle proactif de l'humain est indispensable dans l'évaluation des développements observés (modèles conceptuels, nouvelles normes, paradigmes de l'I4.0 et de l'I5.0) et la création de la valeur, pour parvenir à une connaissance pratique (IAM, 2015) de la GDA, suscitant ainsi une deuxième question. Celle-ci est liée à une collaboration incontournable (Bale et al., 2015), avec de multiples facettes en termes de nature ou de relations, d'avantages et d'exigences (Derrouiche & Neubert, 2013; Fulconis et al., 2014).

Question 2 : Comment situer l'apport des acteurs de la GDA dans ce contexte d'adoption, d'adaptation (modification ou révision) ou d'innovation des modèles conceptuels ?

Cet apport repose sur l'aspect holistique de la GDA impliquant la rupture des silos (Abdul-Nour et al., 2021; Roda & Macchi, 2018; Shahid et al., 2016) et sur une approche envisagée en fonction du contexte des organisations, de la familiarité des acteurs avec ces organisations, de l'accès à leurs données et ciblant leurs intérêts spécifiques (Biard & Nour, 2021; El-Akruti et al., 2018; Glasson & Gibbons, 2015). L'enjeu que suscite la GDA dans ce sens (Brown & Humphrey, 2005) introduit une troisième question en rapport avec la relativisation des spécificités en GDA (Konstantakos et al., 2019).

Question 3 : Comment justifier la démarcation des modèles dans le secteur de l'électricité sous l'industrie 4.0 ?

La démarcation des modèles dans divers secteurs peut être la conséquence de diverses perceptions de la GDA par ses acteurs (GFMAM, 2014), qui évoluent dans des contextes différents ou non. Mais cette discipline constitue un paradigme (au-delà de faire des choses sur les actifs physiques (Komljenovic et al., 2015; Roda & Macchi, 2018)), doublé de celui de l'I4.0 dont les implications peuvent conduire à des approches ou pratiques différentes (Mattioli et al., 2020; Sjøbakk, 2018). Le lien entre ces deux paradigmes suggère d'adopter une perspective positive face aux changements (incluant complexité,

incertitudes, risques, et adaptation) et adresse une quatrième question en termes d'opportunité d'apprentissage pour les organisations en GDA (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018).

Question 4 : Comment l'apprentissage incorporé aux différents modèles constitue un facteur d'amélioration d'une GDA supportée par l'industrie 4.0?

Pour répondre à ces questions, cette recherche fixe plusieurs objectifs devant servir d'orientation pour parvenir à des résultats.

1.3 - Objectifs de la recherche

L'objectif principal est d'examiner la pertinence et la finalité de divers modèles conceptuels dans la contribution à la valeur et à l'avancement de la discipline de GDA pour les organisations.

La pertinence assure qu'un modèle apporte les réponses aux besoins de l'organisation, tandis que la finalité assure que ce modèle sert de guide de l'aspect stratégique à l'aspect opérationnel ou pratique (Brown et al., 2014; Brown & Humphrey, 2005; Too, 2012). Cette contribution met l'accent sur les aspects qui ont une influence sur le système de GDA (contexte de l'organisation, concepts de cycle de vie, décision, risques, Industrie 4.0, Industrie 5.0, etc.) et s'adresse de façon large aux modèles existants ou à élaborer.

Cet objectif principal se décline en plusieurs objectifs secondaires :

- ✓ Analyser et comparer des modèles conceptuels de GDA
- ✓ Identifier les principales caractéristiques des modèles conceptuels qui sont pertinentes pour une GDA optimale considérant le cycle de vie des actifs physiques, notamment de Production, Transport, et Distribution Électriques (PTDEs)
- ✓ Indiquer la portée de l'I4.0, de l'I5.0 ou de théories crédibles dans la conceptualisation en GDA pour la contribution à la valeur et son avancement pour les organisations.

Une étape préliminaire à l'atteinte de ces objectifs consiste à préciser les enjeux liés à la problématique évoquée.

1.4 - Enjeux de la conceptualisation en GDA

Cette recherche est en rapport avec la conceptualisation qui exploite des théories et concepts variés dans le but d'élaborer un cadre ou un modèle (AMC, 2014; El-Akruti & Dwight, 2013) pouvant être facilement communiqué ou compris (Peterson, 2006) dans l'environnement (ou écosystème) où évoluent une organisation et ses PP. Dans ce cas particulier, le concept de GDA est le point de départ dans la manière de comprendre une ou plusieurs organisations concernées. Cette compréhension est formalisée à travers un modèle conceptuel (terme traduit du modèle de l'IAM (2015) ou utilisé par le GFMAM (2014)) ou modèle de concept (terme traduit du modèle de l'AMC (2014)), ou une autre désignation rassemblant les mêmes caractéristiques. L'approche conceptuelle doit être holistique par ses contributions et ses acteurs, et peut conduire, soit à adopter des modèles existants comme tels, soit à les adapter, modifier ou réviser (IAM, 2015, 2024; Mattioli et al., 2020), ou alors à élaborer de façon originale des modèles novateurs (Glasson & Gibbons, 2015; Komljenovic et al., 2016).

D'après le GFMAM, « *un modèle conceptuel décrit, au plus haut niveau, les aspects principaux de la GDA, leurs interactions et leur lien avec les objectifs généraux et le plan d'affaires de l'entreprise* » (GFMAM, 2014). L'IAM (2024) définit son précédent modèle conceptuel comme une représentation des idées principales de la capacité organisationnelle. C'est le premier niveau d'abstraction, généralement stratégique, pouvant conduire ensuite à une décomposition suivant des niveaux de détail inférieurs (AMC, 2014). Différentes perceptions sont observées dans les approches d'élaboration de tels modèles, en raison de l'arrière-plan, la culture, des objectifs, des définitions de la GDA (GFMAM, 2014), des perspectives et des contextes des acteurs ou des organisations (Konstantakos et al., 2019; Too, 2012). Certains items (principes, approche de cycle de vie, contexte, mesure de la performance, amélioration continue, etc.) peuvent être

communs (GFMAM, 2014), avec diverses interprétations ou structurations (regroupements), appelées à évoluer (Benade, 2015; IAM, 2015, 2024).

Selon Peterson (2006), un modèle utile doit être simple (dans son concept), intuitif (principes compris sans orientation), cohérent (dans son application), intégral (comportant les éléments nécessaires au succès).

Les modèles peuvent intégrer plusieurs disciplines transversales, des concepts, des théories et des standards vérifiables, et s'appuyer sur des plateformes qui guident leur implémentation (AMC, 2014; El-Akruti & Dwight, 2013; El-Akruti et al., 2018; Federation of Canadian Municipalities [FCM], 2018; Komljenovic et al., 2016; Roda & Macchi, 2018), en visant le principe central de la valeur (Crespo Márquez et al., 2020; Roda et al., 2016). Les modèles conceptuels permettent de :

- documenter les principes fondamentaux, préciser le contexte et la frontière (gestion, organisation(s), ou concept(s)) dans un ensemble cohérent,
- situer la GDA de manière globale selon sa portée (IAM, 2015) dans le contexte d'une ou de plusieurs organisations, et l'appréhender dans sa relation avec un système de management de la GDA (activités, fonctions, processus, divers actifs ou items en relation) et non pas de management pour les actifs (IAM, 2024); ce système favorise l'évaluation des actions ou décisions (ou leurs impacts), des actifs physiques ou de l'organisation dans son ensemble (IAM, 2015).

Plusieurs concepts évoqués par cette recherche (performance, risque, cycle de vie, décision, durabilité, évaluation, industrie intelligente, etc.) sont opérationnalisés par diverses mesures (efficacité, index ou niveaux d'opportunités, de service, de maturité ou de capacités, de connectivité, etc.), et sont reliés à des mots-clés dont la combinaison favorise la revue de littérature, qui fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre est basé sur une revue de littérature systématique. L'exploration de la littérature est effectuée dans les bases de données SCOPUS, IEEE Xplore, Taylor & Francis, Google Scholar, les listes de références à partir de mots-clés pour consulter des articles, et à partir du site Google ou des sites web professionnels pour consulter des guides ou livres blancs, des standards, et des modèles cités en références ou connus (ISO, IAM, International Infrastructure Management Manual [IIMM], AMC, Electric Power Research Institute [EPRI], AAMCoG, Conseil International des Grands Réseaux d'Électricité [CIGRÉ], The British Standards Institution [BSI], GFMAM, etc.).

Cette exploration vise à définir les principaux concepts et à effectuer, grâce à une lecture critique, une recension des écrits utile pour situer l'état de l'art des connaissances dans le domaine de recherche concerné et approfondir la réflexion sur le sujet de recherche. La revue de littérature est indispensable pour la mise en œuvre de la méthodologie permettant d'obtenir des données à analyser afin d'apporter des réponses aux questions de recherche.

2.1 - Définitions des principaux concepts

2.1.1 - Concept de gestion d'actifs

Le concept de gestion d'actifs fait son apparition vers les années 1980, à la suite des désastres survenus sur le plan industriel (effondrement d'une plateforme pétrolière, baisse des prix du pétrole), et sur le plan public (chute des niveaux de service, mauvaise planification, déclin des investissements, etc.) selon l'IAM (2015). Ce constat interpelle les industries et les organisations gouvernementales (Too, 2012), les corps professionnels, puis la recherche qui s'implique vers les années 1990. La publication des standards Publicly Available Specification [PAS] 55 (en 2004, puis en 2008) dédiés aux actifs physiques intervient pour clarifier le concept en faveur des industries grâce aux contributions des corps professionnels BSI et IAM associés à des chercheurs et d'autres organisations de plusieurs secteurs (BSI, 2008a). L'Organisation internationale de normalisation [ISO], sur la base des standards PAS 55 et des contributions des corps professionnels associés, formalise le concept de GDA par la famille de normes ISO 5500X

en 2014. Dans son origine, ce concept correspond à la nécessité d'une gestion stratégique en équipes multidisciplinaires qui considère la vie entière des actifs physiques diversifiés, comme devant s'intégrer et contribuer à un plus vaste ensemble pour créer la valeur (IAM, 2015; Seow et al., 2016). La norme ISO 55000 de 2014 est abrogée et une révision technique majeure, en harmonie avec d'autres normes ou standards par la version ISO (2024a) modifie les principes de GDA, en introduisant ses résultats, le thème de sa maturité et l'intégration des systèmes de management, et en étendant ses bénéfices.

La GDA est une discipline en pleine maturation (Komljenovic & Abdul-Nour, 2015) ; la terminologie répandue dans la littérature peut susciter des difficultés de compréhension, de la complexité, et accentuer la fragmentation (Konstantakos et al., 2019; Too, 2012), ou constituer un obstacle pour l'évolution vers les meilleures pratiques. Les principales définitions sont fournies par la suite.

- Actif : « *item, chose ou entité qui a une valeur potentielle ou réelle pour un organisme* », et pouvant être physique ou non, critique par l'impact sur la réalisation des objectifs (ISO, 2024a). Considéré dans le cadre de cette étude comme tangible et fixe, un actif physique (infrastructure, machinerie, de transport) fournit des services (pour générer des revenus) à une organisation et en reçoit, tout au long de son cycle de vie, en nécessitant des efforts et des coûts considérables pour garantir une utilisable efficace (Ouertani et al., 2008). Cette définition peut s'étendre à un système d'actifs physiques multiples (Petchrompo & Parlidak, 2019). Ces actifs ont une relation critique avec d'autres (humains, financiers, d'information et intangibles) dans le système de GDA (BSI, 2008a; Crespo Márquez et al., 2020) tel qu'illustre par la Figure 2-1.

Les systèmes d'actifs physiques deviennent de plus en plus sophistiqués, intelligents, complexes, pour des raisons de compétitivité et d'agilité, dans un environnement dynamique adressé par la GDA dans un contexte d'I4.0, en apportant des changements qui impactent plus particulièrement les humains. Ces impacts se rapportent à la gestion de la SST, aux interactions humain – technologie – processus (collaboration,

complémentarité, prise de décision, expérimentation et apprentissage réciproque), à l'employabilité et l'acquisition de nouvelles habiletés ou compétences (par l'apprentissage), à la transformation des organisations (Ansari et al., 2018; Jemai et al., 2023).

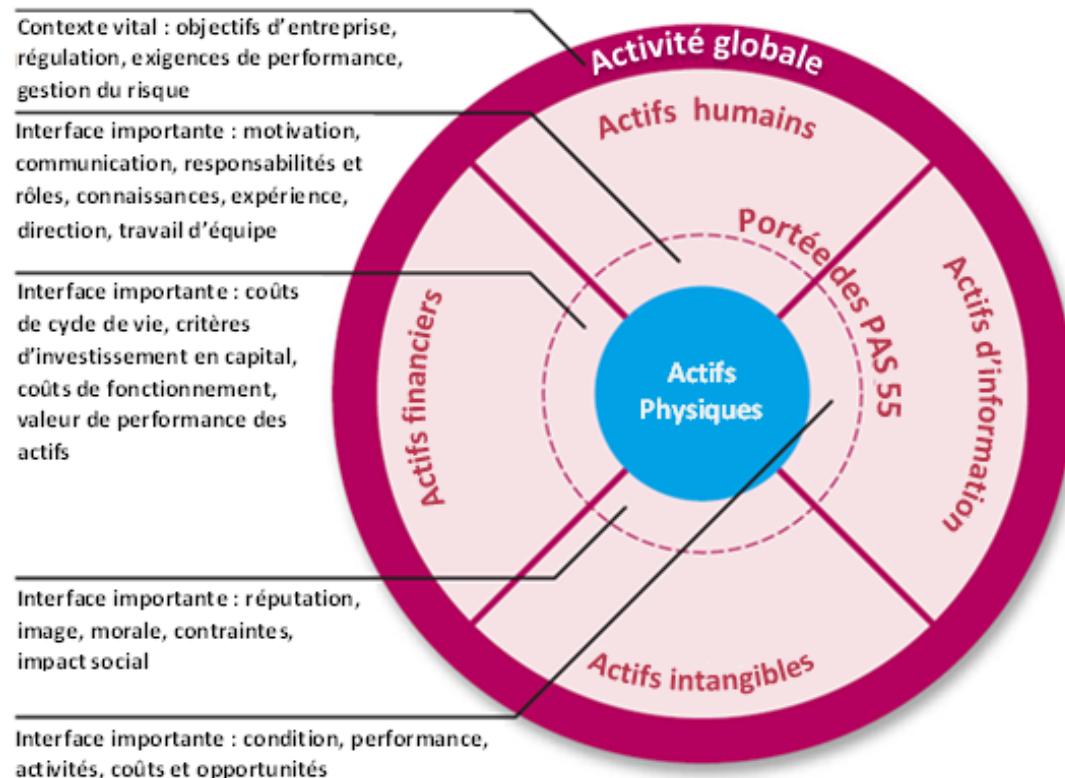


Figure 2-1 : Accent et contexte du PAS des actifs physiques par rapport aux autres catégories d'actifs (BSI, 2008a)

- Gestion d'actifs (GDA) : « *activités coordonnées d'un organisme dans le but de réaliser de la valeur à partir d'actifs ; la réalisation de la valeur suppose normalement de parvenir à un équilibre entre les bénéfices des coûts, des risques, des opportunités et des performances* » (ISO, 2024a). Ces quatre aspects peuvent avoir un impact mutuel (Crespo Márquez et al., 2020; El-Akruti & Dwight, 2013; IAM, 2015; Khuntia et al., 2016; Komljenovic et al., 2016). La valeur est donc critique et constitue un des piliers de la GDA (Crespo Márquez et al., 2020).
- Vie d'un actif : « *période allant de la conceptualisation d'un actif à sa fin de vie; la vie utile correspondant à la période pendant laquelle un actif est capable de remplir*

un objectif pour une entité » (ISO, 2024a), avec des nuances sur le plan physique, technique, ou économique (Crespo Márquez et al., 2020; Khuntia et al., 2016).

- Cycle de vie : « *phases d'un actif au cours de sa vie* », chacune correspondant à différentes activités et différents processus (ISO, 2024a), en commençant par la phase recherche, ingénierie et conception avec l'identification du besoin en actifs pour un objectif de l'organisation, suivie des phases acquisition et création, opération, maintenance, et retrait (El-Akruti & Dwight, 2013; Mattioli et al., 2020; Shah et al., 2016; Wardani & Naswil, 2017). La maintenance catégorise les actifs physiques en systèmes réparables (surveillés, défaillance découverte dès son occurrence et faisant l'objet d'une réparation initiée immédiatement, sans remplacement des systèmes entiers), ou non réparables remplacés à la défaillance (Basu & Rigdon, 2000). La maintenance implique divers modèles ou concepts (Lundgren et al., 2018; Seow et al., 2016), plusieurs disciplines (sûreté de fonctionnement, risques, sécurité, etc.) et différents impacts, et doit contribuer à la valeur. La gestion du cycle de vie s'effectue à la fois sur plusieurs plans. Le plan technique concerne l'opération des systèmes d'actifs, leur état, la défaillance et l'effet mutuel avec la performance (Komljenovic et al., 2016; Petchrompo & Parlikad, 2019). Le plan économique se préoccupe des coûts induits, des revenus, et des marchés (CIGRÉ, 2014; IAM, 2015). Le plan sociétal prend en charge l'impact des interruptions ou perturbations (Komljenovic et al., 2016), et le plan environnemental adresse l'impact sur le climat et la santé des populations, régissant des restrictions imposées en conséquence, notamment aux énergies fossiles (Baxter & Pandey, 2016; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016). La mise en œuvre de ce cycle comporte des activités exercées sur les actifs physiques (chaîne de valeur) et des activités de soutien, en interrelations et intégrées, décrites en termes de temps, d'organisation et d'espace (Brown & Humphrey, 2005; El-Akruti & Dwight, 2013; Laue et al., 2014), et contribuant à la création de la valeur.

La Figure 2-2 illustre la relation entre les termes clés : GDA, système de GDA [SGDA] (ISO, 2024a)), et actifs. Le SGDA est un système structuré, regroupant les principes fondamentaux et comportant plusieurs éléments (la structure, les rôles et les

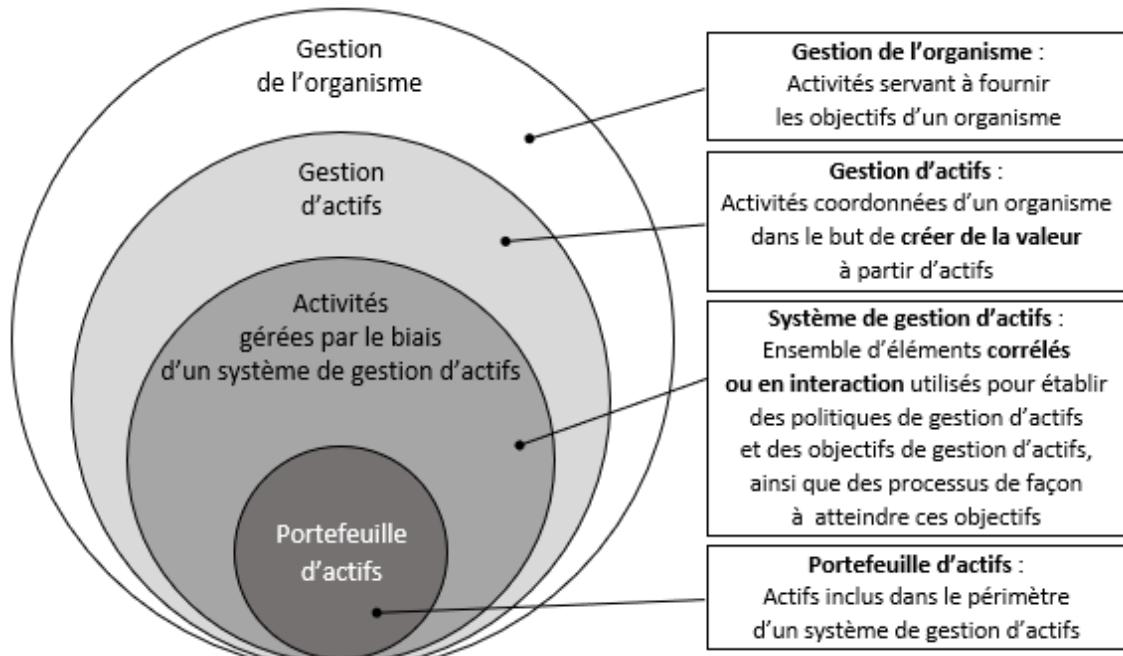


Figure 2-2 : Relation entre les termes clés de la gestion d'actifs (ISO, 2024a)

responsabilités, la planification et le fonctionnement), et utilisé par des organismes pour diriger, coordonner et contrôler leurs activités afin de favoriser la GDA. Les exigences d'un tel système constituent le modèle ISO pour la GDA (ISO, 2024b).

Plusieurs autres définitions de la GDA existent dans la littérature, souvent élaborées en fonction du type des actifs, du contexte des organisations, ou en incluant la notion de cycle de vie (BSI, 2008a; Institute of Public Works Engineering Australasia [IPWEA], 2015; Too, 2012). La terminologie utilisée peut être également spécifique aux divers secteurs (Adiansyah et al., 2015; Leitch & Ellsworth, 2016; Lemerande, 2018; Rinaldi et al., 2017).

Dans un souci d'efficacité de la GDA, la révision de la norme ISO 55000 (ISO, 2024a) préconise l'adoption et l'application de principes, « *lignes directrices fondamentales relatives à la prise de décision, au comportement et aux actions au sein de l'organisation* », regroupés au sein d'un système structuré de GDA; les principes retenus sont les suivants :

- ✓ valeur, « *résultat de la satisfaction des besoins et des attentes* », qui provient de « *la prise en compte des impacts positifs ou négatifs, financiers ou non, sur les parties intéressées (parties prenantes), à un horizon temporel incluant tous ces impacts.* » Comme principe clé, « *la GDA se concentre sur la valeur que les actifs apportent à l'organisation au fil des temps* », en s'appuyant sur les objectifs de l'organisation, la gestion du cycle de vie et les processus de prise de décision.
- ✓ d'alignement, des décisions (financières, techniques et opérationnelles) sur les objectifs de l'organisation de manière coordonnée pour les différentes phases du cycle de vie des actifs.
 - sur le plan vertical (lien entre mission de l'organisation, objectifs de GDA, stratégies, plans et activités)
 - et sur le plan horizontal (collaboration entre services, fonctions et responsabilités)
- ✓ leadership, qui préconise un engagement durable, et par son efficacité, établissent une orientation claire (rôles, responsabilités et autorités), exigeant la transparence et la collaboration.

Les résultats énoncés par la même norme sont principalement la réalisation de la valeur et des objectifs de l'organisation, et certaines caractéristiques provenant d'une approche systématique de GDA telles que :

- ✓ l'assurance (par le contrôle et la responsabilité),
- ✓ l'adaptabilité (aux changements du contexte par la surveillance des environnements et la réactivité),
- ✓ la soutenabilité (objectif du développement durable, par la prise en compte des impacts futurs),
- ✓ ainsi que des bénéfices multiples (performances, prise de décision, image, efficience et efficacité, coordination et communication améliorées, renforcement de la résilience par la gestion des risques et opportunités, démonstration de la conformité, etc.).

La stratégie de GDA exige que les besoins en actifs (durant leur vie utile pour la fonction requise) et leur retrait (en fin de vie), l'allocation des ressources, la planification et les performances relèvent d'une décision globale (considérant les investissements liés à un risque financier, un retour sur investissement). Cette décision implique une vision à long terme (Alvarez et al., 2019; El-Akruti & Dwight, 2013; Khuntia et al., 2016; Laue et al., 2014), associée à une évaluation, aux compétences et aux technologies intégrées (Konstantakos et al., 2019; Too, 2012).

La GDA se focalise sur le contexte de l'organisation (ISO, 2017) ; ainsi, les concepts abordés, les besoins et activités, les intérêts des PP qui nécessitent leur engagement (IAM, 2015), sont intégrés et alignés dans une même approche pour atteindre les objectifs de l'organisation, notamment la création (ou « *co-création* » (Fulconis et al., 2014)) de la valeur, et l'attractivité des investissements. C'est donc un paradigme d'un accent bien plus large que le fait d'effectuer des activités isolées, à court terme ou de manière réactive sur les actifs (Brown & Humphrey, 2005; ISO, 2017), ou encore limitées à la fiabilité et à la maintenance (Komljenovic et al., 2016).

De manière synthétique, une organisation choisit, utilise et prend soin des actifs physiques durant leur cycle de vie (IAM, 2024), en relation avec son environnement (c'est-à-dire de manière soutenable), afin d'atteindre ses objectifs, en profitant des opportunités et en limitant les risques, pour des performances ciblées et des coûts optimisés. Selon Brown et Humphrey (2005), les entreprises doivent accroître leurs revenus et satisfaire les PP, malgré les restrictions (capitaux, incertitude liée à la réglementation, etc.), qui sont des opportunités de déclenchement pour une GDA globale, efficace supportée par ses piliers de compétences.

La GDA, en tant que discipline holistique, vise l'intégration de savoirs qui constituent une valeur ajoutée dans la vie entière des actifs, et peuvent être organisés autour de modèles d'affaires (Bosisio et al., 2019; Brown & Humphrey, 2005), conceptuels (IAM, 2015), stratégiques (AAMCoG, 2012; Laue et al., 2014), fonctionnels (AMC, 2014; El-Akruti & Dwight, 2013), de décision (Komljenovic et al., 2019; Vermeer et al., 2015), de valeur,

ou hybrides, etc. La Figure 2-3 représente le modèle conceptuel de l'IAM (2015), assez répandu dans la littérature et encore autorisé simultanément avec la publication de sa révision de 2024, abordée par la suite.

Les types de modèles cités précédemment peuvent être complémentaires, afin d'adresser l'aspect multidisciplinaire de la GDA, favorisant son renforcement par l'I4.0 dont les modèles d'affaires visent le même aspect, et bien d'autres qui sont communs, tels

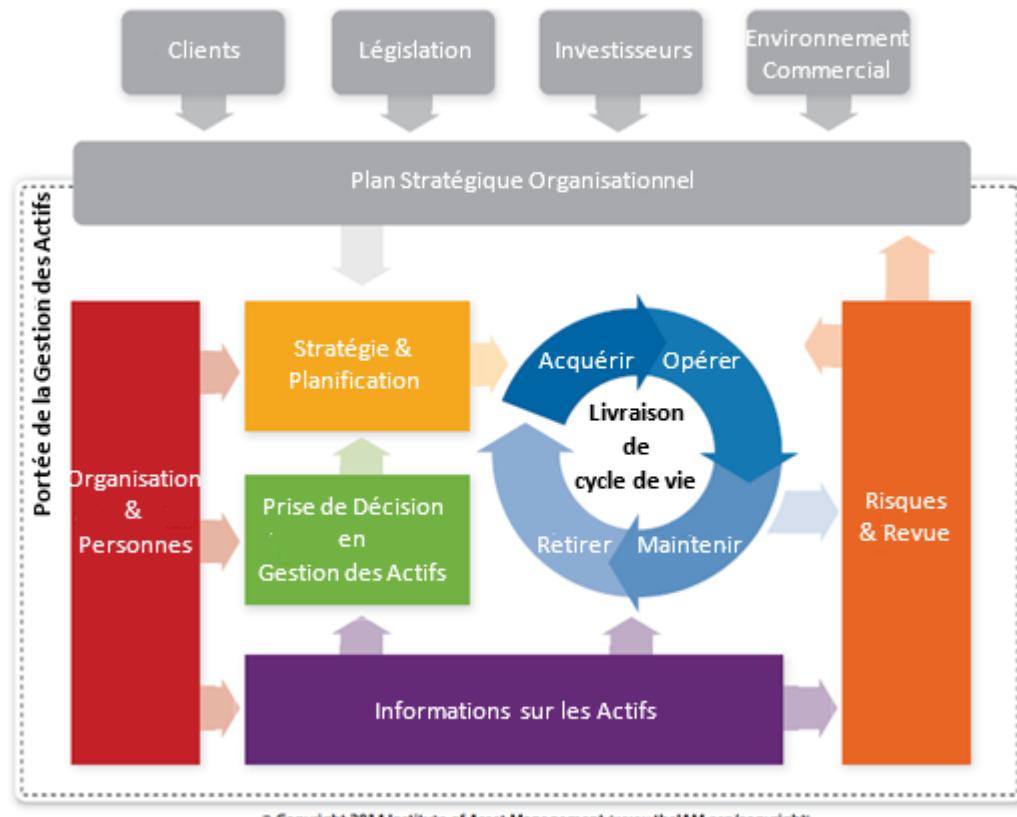


Figure 2-3 : Modèle conceptuel de GDA (IAM, 2015)

que : stratégie, intégration, cycle de vie, complexité, culture du changement, données, informations et outils appropriés pour la décision (ISO, 2024a; Rojko, 2017; Silva et al., 2020). Par contre, l'I 4.0 révolutionne le modèle de gestion par la prépondérance de l'analyse des données massives dans la prise de décision (Biard & Nour, 2021), et par la connectivité avancée (Rojko, 2017). Ces paradigmes nécessitent d'appréhender le concept et les principes de l'I4.0, pour cerner les opportunités offertes à la GDA, mais qui

s'accompagnent de perturbations reflétant la nécessité d'opérer des changements ou transformations, et de réviser les modèles de GDA.

2.1.2 - Concept et principes de l'Industrie 4.0

Le concept de l'Industrie 4.0 (I4.0) est apparu en 2011 lors d'une foire organisée à Hanovre par le gouvernement Allemand (soutien dans le domaine des machines et de la production automobile), puis est suivi par d'autres concepts similaires : Smart factory (ou usine intelligente, USA), l'Industrie du futur (France) et Made-in-China (Chine), etc. (Rojko, 2017).

Ce concept peut se définir comme « *une stratégie d'industrie intégrée basée sur l'utilisation des technologies numériques et des données en temps réel pour améliorer la prise de décision, l'efficacité et l'agilité dans les processus administratifs et opérationnels, tout en permettant la personnalisation de masse, tant au niveau des produits que des services offerts* » (Gamache, 2019). L'I4.0 cible les processus (déttection, réparation, pronostic, etc.), les produits ou actifs (équipés de capteurs), et les services (dispositifs, compteurs, etc.), en vue de leur transformation, notamment pour les rendre intelligents. Les objectifs visent à développer de nouvelles pratiques d'affaires (relation bidirectionnelle avec les autres industries, et la clientèle des particuliers, en temps réel), et à gagner des avantages compétitifs (Gamache, 2019; Silva et al., 2020) selon le contexte.

Ce contexte est décrit par un modèle de haut niveau à trois dimensions que sont le cycle de vie des installations et des produits, le niveau de connectivité, et l'architecture de l'organisation (Rojko, 2017), permettant une approche structurée des systèmes de l'I4.0 et leurs interactions. L'évolution dans ce contexte nécessite la mise en œuvre des préalables suivants axés sur la chaîne de valeur (Gamache, 2019; Silva et al., 2020) :

- La transformation numérique (format des données, informations et leur support, applications, technologies et mise en réseau (Scharl & Praktiknjo, 2019)).
- L'intégration (chaîne de valeur, pilotage des organisations, données tout au long du cycle de vie (Moeuf, 2018), système de surveillance de la condition, à travers des

infrastructures de réseau (Shahinzadeh et al., 2019)) dans les SCP, qui assurent de façon autonome la coordination, le contrôle et l'opération en temps réel, et la prise décision d'entités physiques et virtuelles (ou jumeaux numériques (IAM, 2024; Scharl & Praktiknjo, 2019)) par la connectivité.

- L'intelligence, qui est la capacité des systèmes et processus à collecter et à analyser des données pour la coordination et la décentralisation (Gamache, 2019; Scharl & Praktiknjo, 2019).
- La connectivité, capacité à échanger des données d'une entité à une autre (composantes du réseau électrique intelligent par exemple (Shahinzadeh et al., 2019)) pour faciliter le transfert d'information, la prise de décision et l'analyse plus avancée des données collectées (Gamache, 2019; Scharl & Praktiknjo, 2019), par l'IoT ou par l'Internet des Objets industriel (Industrial Internet of Things [IIoT]).

Les principes qui caractérisent ce contexte favorisent l'utilisation des nouvelles technologies (Gamache, 2019; Silva et al., 2020), notamment :

- L'interopérabilité, qui est la capacité de toutes les entités (humain, produits, systèmes ou réseaux, applications) à fonctionner de manière collaborative via l'IoT par l'échange de données (exemple, entre unités éoliennes et unités de stockage d'énergie (Shahinzadeh et al., 2019)).
- La décentralisation, permettant aux humains ou systèmes de prendre des décisions de manière intelligente, rapide et précise sur la base de l'information locale (exemple des ressources d'énergies renouvelables accessibles, même dispersées, et respectant l'environnement (Liboni et al., 2018; Scharl & Praktiknjo, 2019; Shahinzadeh et al., 2019)).
- La capacité en temps réel, qui est l'aptitude des processus pour le contrôle en fonction des contraintes en temps réel (météo, reconfiguration de réseau, transfert et analyse des données, disponibilité de sources de données par les jumeaux numériques des ressources d'énergies renouvelables (Liboni et al., 2018; Scharl & Praktiknjo, 2019; Shahinzadeh et al., 2019)).

- L'orientation service, modèle de service du système d'information qui contrôle la surveillance et l'analyse des données collectées des capteurs intégrés aux appareils (réaction sensible de la clientèle à la tarification et à la qualité en temps réel de l'électricité (Shahinzadeh et al., 2019)).

Les préalables doivent faciliter le déploiement des technologies, regroupées selon une première approche de l'I4.0, en 9 piliers qui transforment l'industrie, et représentés sur la Figure 2-4 : IIoT, données massives et analytiques (Big Data and Analytics [BDA]), intégration horizontale et verticale des systèmes, simulation, infonuagique (Cloud Computing ou CC), réalité augmentée, robots autonomes, fabrication additive et cybersécurité (Silva et al., 2020; Silvestri et al., 2020).

D'autres technologies comprenant :

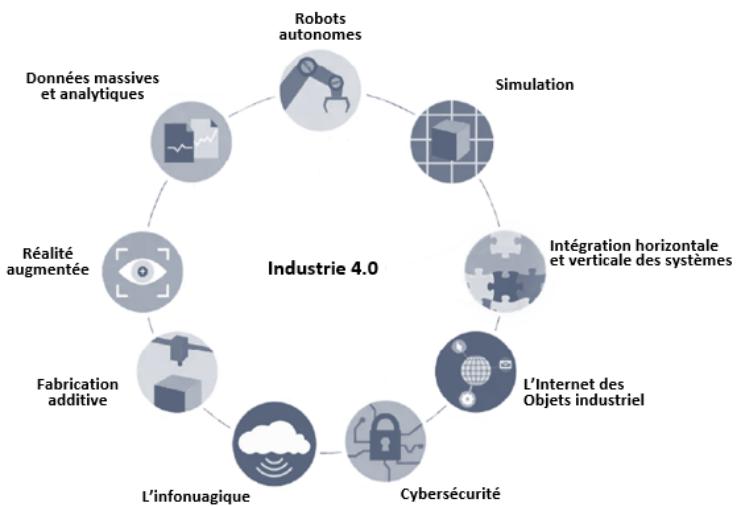


Figure 2-4 : 9 Technologies qui transforment l'industrie (Silva et al., 2020)

les drones, les compteurs intelligents, des appareils mobiles, ou d'autres applications associées à l'apprentissage automatique (ML) et l'IA sont également présents dans l'industrie. Une seconde approche, qui va au-delà des processus de production, décrit un environnement de relations d'usines, de technologies et ses nouveaux paradigmes d'un « Internet des objets, des services, des données et des personnes » pouvant apporter des changements dans la vie des individus et les relations sociales (Silva et al., 2020). Une troisième, systémique et plus cohérente dans le sens de la quatrième révolution, illustre la

relation entre les nouvelles technologies, et la chaîne de valeur et ses processus dans un écosystème durable caractérisé par l'interconnexion et la communication de tous les systèmes (en faveur de l'autonomie et de l'optimisation de la productivité), alimenté et maintenu par des sources principales d'énergie (Silva et al., 2020).

Dans le cas du domaine de l'électricité, l'évolution des réseaux électriques est impulsée par le potentiel et l'impact de l'I4.0 qui donnent une nouvelle dimension, de nouvelles perspectives pour des réseaux intelligents (réseau intelligent de l'I4.0, service public d'électricité 4.0, réseau intelligent 2.0, Énergie 4.0, etc.), et de nouveaux défis (Amelete et al., 2021; Biard & Nour, 2021; Liboni et al., 2018; Scharl & Praktiknjo, 2019; Shahinzadeh et al., 2019).

Certains piliers de l'I4.0 offrent également plusieurs opportunités à la maintenance (processus de gestion, réalisation, support, dans un contexte de maintenance 4.0), et dans le rôle des opérateurs (opérateurs 4.0), impliquant des changements et une adaptation conséquente (Ansari et al., 2018; Silvestri et al., 2020).

2.1.3 - Industrie 5.0 : complément de l'Industrie 4.0

L'I4.0 constitue une révolution, indiquant « un changement radical dans les façons de faire » (Gamache, 2019), et mettant l'accent sur la technologie. Selon Anne Leitzgen (citée par Pellerin et al., 2019, p. 13), « plus de digital nous conduit à développer toujours plus d'humains ». Dix ans après l'introduction de l'I4.0, la Commission européenne a introduit l'Industrie 5.0 (I5.0), une vision cohérente du futur de l'industrie européenne, qui « *complète le paradigme actuel (Industrie 4.0) en mettant en avant la recherche et l'innovation en tant que moteurs de la transition vers une industrie européenne durable, centrée sur l'humain et résiliente* » (Breque et al., 2021). L'I5.0 vise à « *mieux intégrer les priorités européennes, sociales et environnementales dans l'innovation technologique et déplacer l'accent des technologies individuelles vers une approche systémique* » (Breque et al., 2021). De plus, cette initiative axée sur la valeur pour toutes les PP concernées encourage la transformation technologique comme facilitatrice dans l'atteinte des buts sociétaux (respect des limites planétaires, prospérité, bien-être des travailleurs,

etc.) pour l'industrie (Breque et al., 2021; Xu et al., 2021). Les implications de ces stratégies ou initiatives sont évoquées par la suite.

2.2 - Présentation des modèles conceptuels

Cette présentation permet de distinguer les principaux modèles, puis les modèles spécifiques de différents secteurs abordés selon leurs objectifs et dont la plupart sont retenus pour l'analyse. Enfin, cette présentation relève des aspects méthodologiques des modèles conceptuels et les implications de l'I4.0 ou de l'I5.0 en GDA.

2.2.1 - Principaux modèles conceptuels de GDA

Les modèles génériques sont considérés comme pouvant être utilisés pour tous les types d'organisations, d'actifs physiques ou leurs secteurs (Brown et al., 2014; ISO, 2024a, 2024b; Komljenovic et al., 2016), tout comme pouvant favoriser l'intégration de plusieurs disciplines et standards (IAM, 2015; ISO, 2024a). Ces modèles sont décrits par la suite.

Le modèle ISO 55001 de 2014 (IAM, 2015), est très influencé par les standards du modèle PAS 55 de BSI dédié aux actifs physiques (BSI, 2008a; Konstantakos et al., 2019) et comporte la même approche de référence Plan, Do, Check, Act [PDCA]) pour ses éléments, mais sans équivalence, et peut convenir à toute forme d'organisation ou d'actifs (IAM, 2015; Konstantakos et al., 2019).

Cette version est abrogée par la révision de 2024 plus approfondie qui conserve les sept groupes d'exigences principales (voir Figure 2-5,

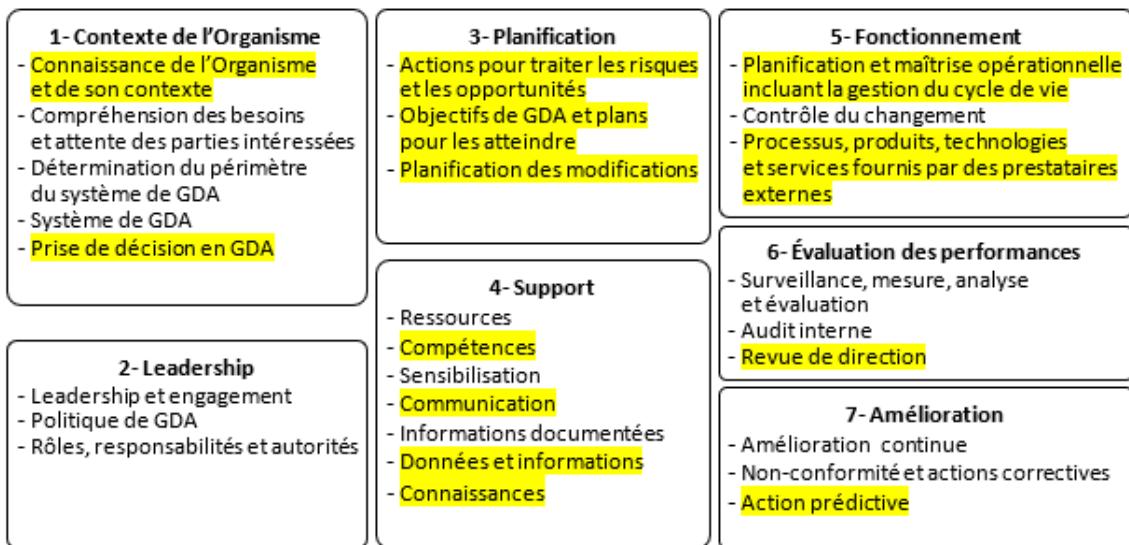


Figure 2-5 : Principales exigences d'un système de GDA (ISO, 2024b)

sur laquelle les surlignées sont nouvelles ou on fait l'objet d'une révision, et dont le détail se ramène à 38, contre 28 dans la version abrogée). Les exigences visent « *l'établissement, la mise en œuvre, le fonctionnement, la maintenance et l'amélioration d'un système de management pour la gestion d'actifs (appelé un système de gestion d'actifs)* », qui doivent respecter une « *harmonisation des Normes de Systèmes de Management* » ISO (ISO, 2024b). D'autres normes de la GDA ou d'autres concepts (environnement, risque, économie circulaire, etc.) contribuent à l'amélioration du système de GDA. La Figure 2-6 est une illustration possible du processus de GDA, de l'aspect stratégique à l'aspect opérationnel, pour un tel système (Konstantakos et al., 2019). Ce dernier doit être tenu à jour et continuellement amélioré (ISO, 2024b), et la conformité à celui-ci constitue un standard minimum, d'un niveau compétent de GDA, et non le but final, qui doit conduire à

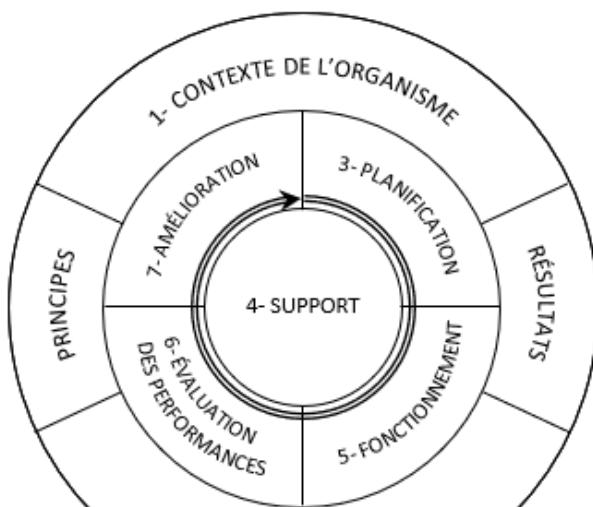


Figure 2-6 : Processus de GDA adapté des exigences de GDA de l'ISO (2024b)

l'implémentation et au développement de capacités au-delà de la conformité (IAM, 2024).

Le modèle de l'AMC, concept de capacités, décrit la base (ou façon de penser) et les principes fondamentaux (accent sur les résultats, capacités, niveau d'assurance, organisation apprenante) de la gestion d'actifs physiques (non-autonome, au sein d'une organisation) en étroite relation avec la valeur (AMC, 2014; GFMAM, 2014), en utilisant également l'approche PDCA en correspondance avec ces principes. Ce modèle illustré par la Figure 2-7 est privilégié pour ses aspects techniques et de leadership situant les PP au plus haut niveau d'encadrement de l'organisation (Shahid et al., 2016) et de chaque système de gestion (GDA, sécurité, environnement, finances) qui y est intégré.

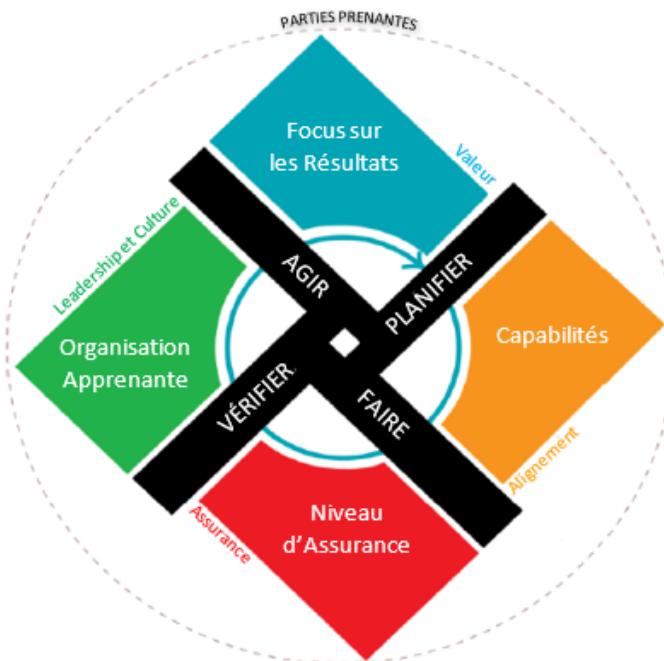


Figure 2-7 : Modèle de concept de GDA (AMC, 2014)

Le modèle de Brown et Humphrey (2005) décrit par la Figure 2-8 un processus unique axé sur trois fonctions interdépendantes : propriété ou propriétaire d'actifs (stratégie et

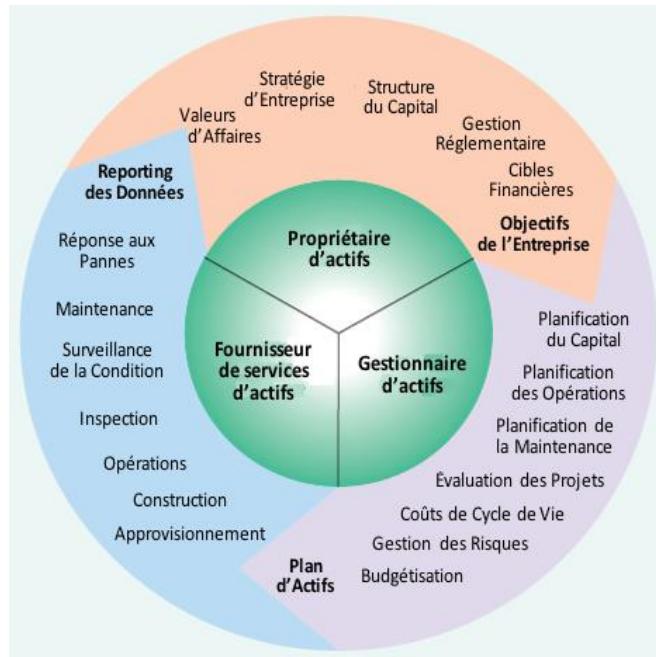


Figure 2-8 : Cadre d'entreprise (Brown & Humphrey, 2005)

objectifs d'entreprise), GDA ou gestionnaire d'actifs (planification et budgétisation), opérations sur actifs ou fournisseur des services d'actifs (excellence opérationnelle), qui favorisent leur accent. Ce processus implique une mutualisation de trois piliers de compétences que sont la gestion, l'ingénierie et l'information, qui garantissent « une utilisation efficiente et durable » des actifs physiques (Brown et al., 2014). Toutefois, la visibilité d'une approche de cycle de vie complète est nécessaire. La séparation de la GDA en trois fonctions, est orientée, selon Bosisio et al. (2019), vers un « modèle d'affaires dans une industrie en mutation ».

Une des variantes du modèle précédent à trois fonctions concerne le modèle du CIGRÉ (2010) de la Figure 2-9, qui représente la structure organisationnelle favorisant la transparence pour les entreprises du transport électrique ; ce modèle supporte la prise de décision en GDA (rôle du gestionnaire) informée du risque. Le concept du cycle de gestion des risques est implanté aux niveaux organisationnels stratégique (critères des risques

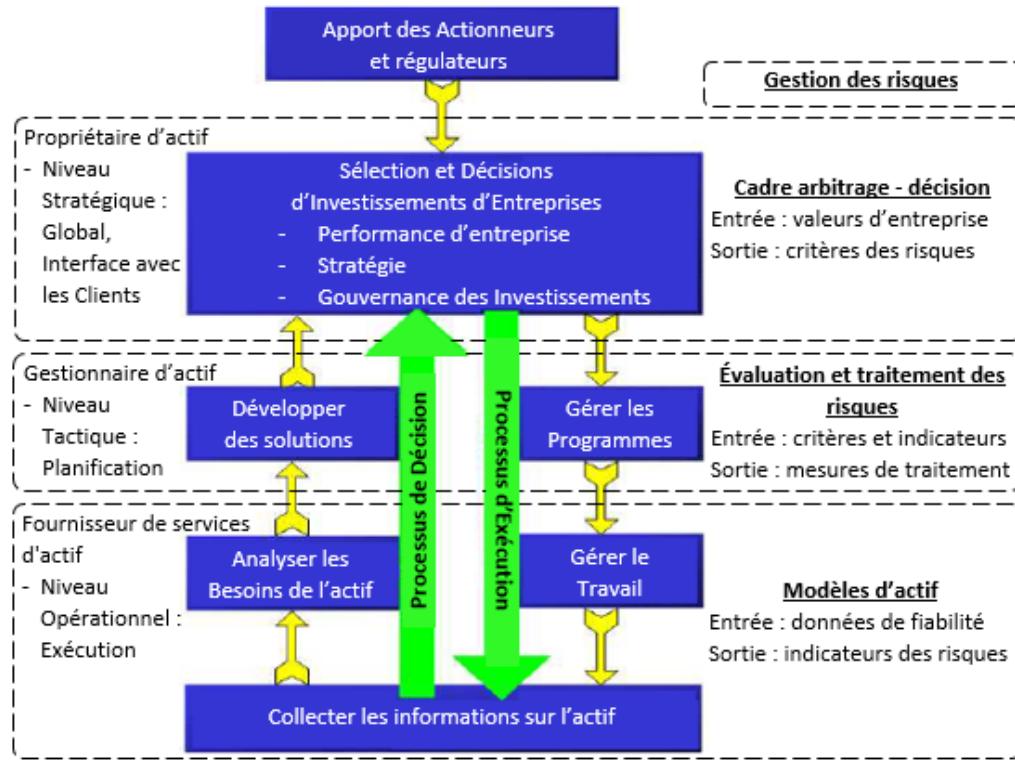


Figure 2-9 : Modèle organisationnel pour les infrastructures (CIGRÉ, 2010)

dérivant du cadre de décision), tactique (évaluation et traitement des risques selon les critères et les indicateurs pour la planification des investissements ou de la maintenance en faveur de la condition des actifs) et opérationnel (sélection des indicateurs des risques pour la surveillance : vieillissement, défaillance, événements extrêmes, croissance de charge, etc.). Ce concept vise une amélioration continue en fonction des changements dans le contexte pour un meilleur traitement des risques en accord avec les valeurs de l'organisation (sécurité, fiabilité, qualité/niveau de service, environnement), et permet de faire le lien entre les risques d'entreprise et ceux des actifs physiques pour une meilleure décision.

L'autre variante décrite par le modèle d'EPRI (2020), définit sur la Figure 2-10 des entrées et sorties, divers processus, points de décision et points finaux avec leur interaction et leur répartition dans les trois fonctions. Cette variante se présente comme une voie émergente d'informations et de guidance axée sur le concept de GDA de livraison de l'énergie

électrique (Power Delivery Asset Management [PDAM]) en raison de ses multiples défis, tels que :

- une grande diversité de tailles et structures des organisations;
- une diversité des valeurs potentielles créées (fiabilité du système ou du service à la clientèle, sécurité du public et des travailleurs, etc.);
- de nombreuses PP (internes et externes aux organisations) et leurs différentes perceptions de ces valeurs;
- des incertitudes sur les performances futures et les exigences liées au service et au système pour l'évaluation et la gestion des risques;
- les difficultés d'alignement des décisions et des actions avec les objectifs stratégiques.

Les efforts en GDA visent l'atteinte d'objectifs conflictuels (maîtrise des coûts, du niveau de qualité de service, de fiabilité élevée, d'incertitude réglementaire, etc.), en présence de deux contraintes importantes que sont le vieillissement des actifs physiques de base (durée de vie ayant dépassé la limite prévue de 40 ans environ) et les ressources limitées (plan financier et vieillissement du personnel technique qualifié). Les similitudes et les

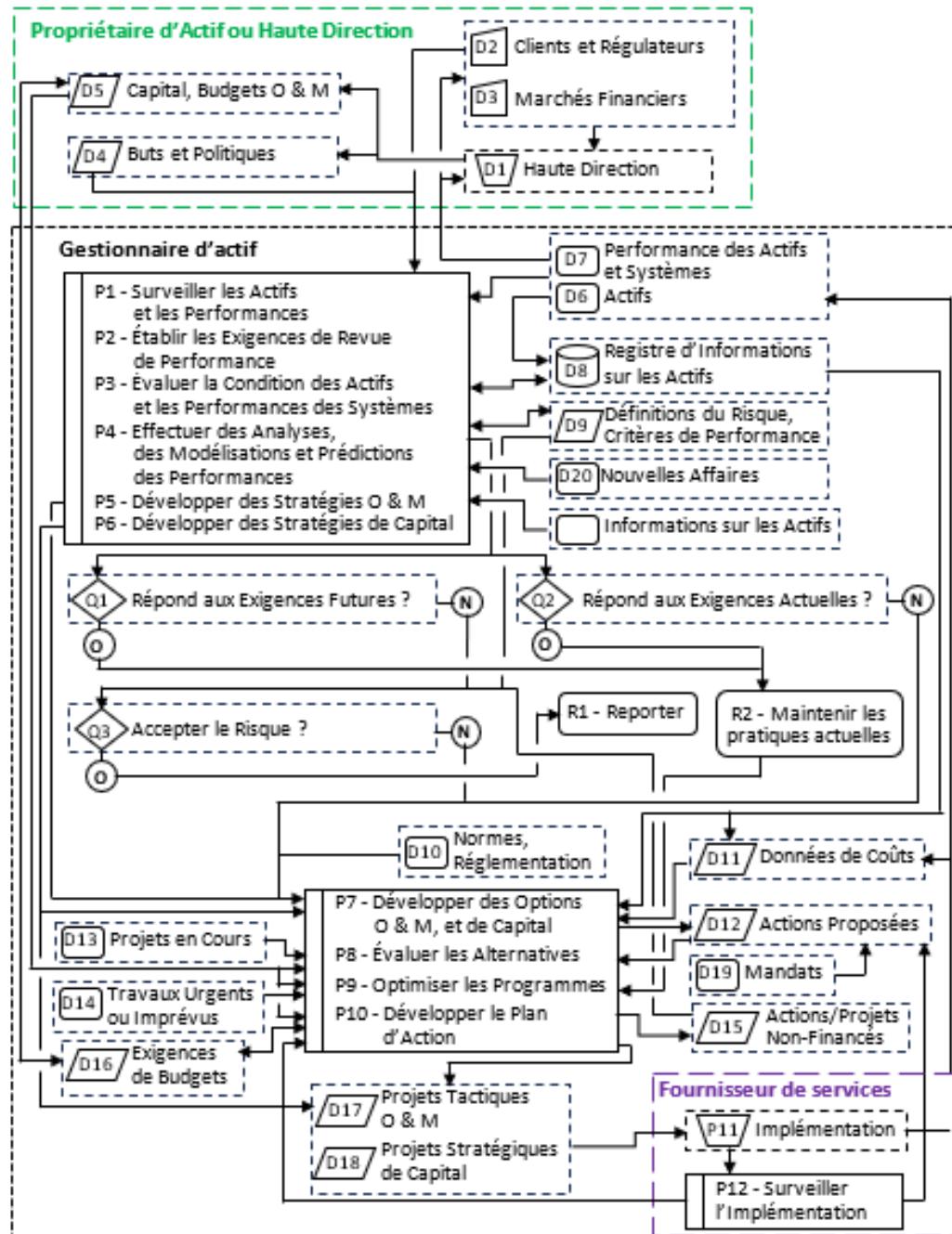


Figure 2-10 : Modèle de GDA de livraison d'énergie (EPRI, 2020)

différences entre le transport et la distribution électriques sont prises en compte à la fois. Les trois fonctions du modèle sont intégrées dans une gestion d'actifs (physiques, temps, personnes, données et connaissances) complexe à plusieurs dimensions visant à optimiser la performance sur l'ensemble du cycle de vie des actifs physiques :

- approche ou philosophie d'entreprise holistique et systématique - pour organiser, structurer et évaluer;
- processus pour une GDA interdisciplinaire;
- ensemble d'outils techniques regroupant les systèmes de gestion, l'information et les analyses).

Au sein de ce cycle, la maintenance consiste en des processus, non pas uniquement centrés sur les équipements, mais devant supporter les buts et objectifs de haut niveau du propriétaire d'actifs en préservant le niveau de service des actifs physiques, et en considérant les définitions des risques et les critères de performance.

Ces deux précédentes variantes, qui visent une meilleure efficience des organisations (CIGRÉ, 2010; EPRI, 2020), sont centrées sur les infrastructures de service public (Too, 2012), et notamment les réseaux de transport et de distribution électriques.

Le modèle AAMCoG (AAMCoG, 2012; Laue et al., 2014), correspond à une approche de gestion d'actifs tout au long de leur cycle de vie, de manière intégrée ou collective impliquant plusieurs organisations ou agences, et catégories d'acteurs dans l'environnement dynamique actuel et complexe (Brown et al., 2014). Selon ces auteurs, cette approche « permet d'accéder à des connaissances, une expertise et des ressources pour créer un avantage collaboratif », étant basée sur un modèle hybride, et conduit à l'évaluation des capacités et de la maturité (Laue et al., 2014). Ce modèle, représenté par la Figure 2-11, se réfère à une GDA intégrée et stratégique (Integrated Strategic Asset Management [ISAM]), moderne, élaborée en considérant un plus grand nombre de PP (Lemerande, 2018; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016), impliquées dans des processus complexes et interconnectés de gouvernance, et desquelles dépendent les solutions appropriées à la prestation des services dans le secteur public (AAMCoG, 2012). Mais ce modèle reste applicable à toute organisation ou tout secteur pour adresser les nouvelles préoccupations (environnement, soutenabilité, résilience, vie entière des actifs, demande croissance, gouvernance étendue, etc.) en GDA (AAMCoG, 2012).

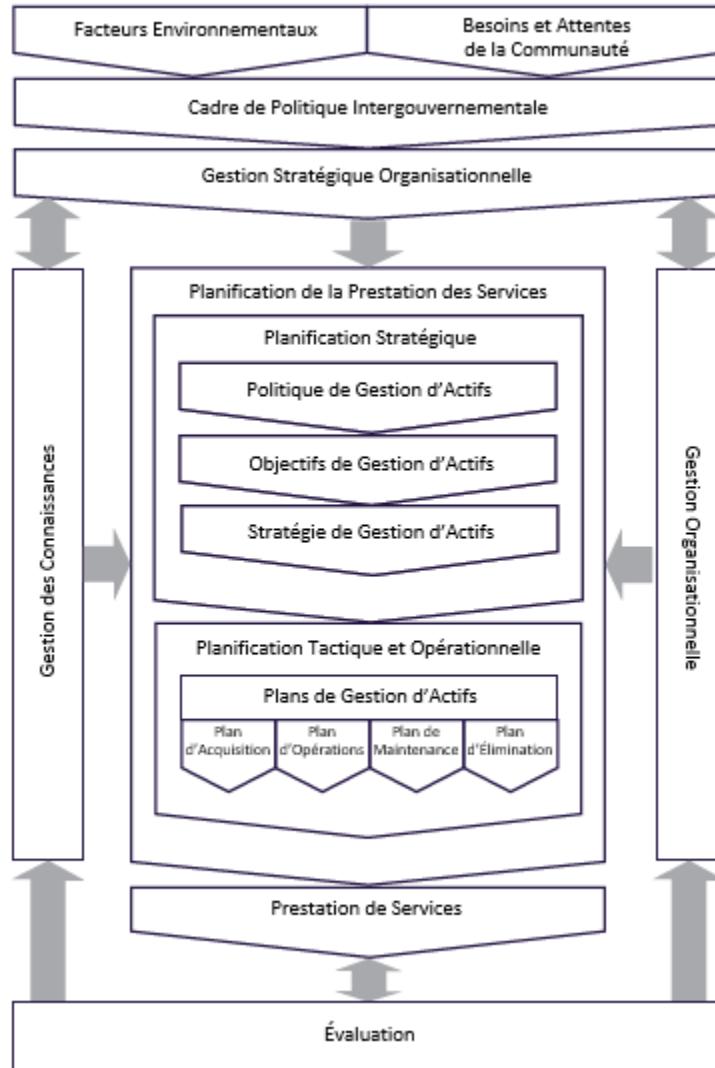


Figure 2-11 : Cadre de GDA stratégique intégrée (AAMCoG, 2012)

Le modèle conceptuel de l'IAM, axé sur « une anatomie » de la GDA, décrit l'organisation dans son contexte, à partir d'un système de gestion d'actifs standard comportant plusieurs activités et incluant plusieurs disciplines. L'objectif visé concerne une connaissance pratique de la discipline de la GDA, avec comme résultat l'adoption dans plusieurs pays, l'amélioration de la discipline, la convergence, et la constitution d'équipes transversales. La version 3 de ce modèle ((IAM, 2015), voir Figure 2-3) est citée en référence pour sa simplicité, mais priorisée à partir d'une prise de décision multicritère propre au secteur du pétrole et du gaz (Vahedi & Movahedi, 2018). Son

évolution permet d'intégrer l'économie circulaire consistant en une nouvelle pensée systémique d'un modèle du cycle de vie des actifs physiques en alignment avec un modèle conceptuel à 10 boîtes d'une GDA facilitatrice pour la réalisation de la valeur dans un contexte de développement durable (IAM, 2022). La version finale introduit 5 principes comme intrants nécessaires de GDA (IAM, 2024), et est en conformité avec les sujets du GFMAM (passés de 39 répartis en 6 groupes (GFMAM, 2014) à 40 répartis en 7 groupes (GFMAM, 2024)), avec un regroupement différent. Ce dernier représenté sur la Figure 2-12 par 10



Figure 2-12 : Modèle de capacités à 10 boîtes de l'IAM (IAM, 2024)

boîtes ou capacités, illustre, sans flèches de relations, un alignement, une chaîne de valeur, et une amélioration continue, à travers les 3 cercles concentriques de niveaux PDCA, la livraison de cycle de vie, le système de GDA, la croissance globale d'une organisation (avec toutes les capacités de GDA) (IAM, 2024). L'IAM valorise la conformité avec la famille de normes ISO 5500X relatives à la GDA (par exemple la cartographie et la méthodologie d'auto-évaluation avec le système ISO 55001 de 2024, l'utilisation du glossaire de l'ISO 55000 de 2024), et la convergence avec le GFMAM de 2024. Toutefois, cette institution considère, dans son anatomie, un système de

management de la GDA holistique dans le contexte d'une discipline plus large (IAM, 2024).

Le modèle de l'IIMM connaît plusieurs évolutions. Le supplément de la cinquième édition de 2015, dont la publication est surtout motivée par la parution de la famille des normes ISO 5500X (55000, 55001 et 55002) en 2014, présente ce modèle comme le document de référence dans le domaine des infrastructures pour la GDA (Biard & Nour, 2021; IPWEA, 2015; Konstantakos et al., 2019), et illustre les 3 étapes logiques de son processus (Konstantakos et al., 2019). La sixième édition (IPWEA, 2020) révise les items de GDA, en l'introduisant par ses fondamentaux et l'alignement de son système avec l'ISO, la décrivant, selon la Figure 2-13, dans la logique précédente par le processus suivant :

- exigences des infrastructures en termes de service, pour développer un plan stratégique de GDA;

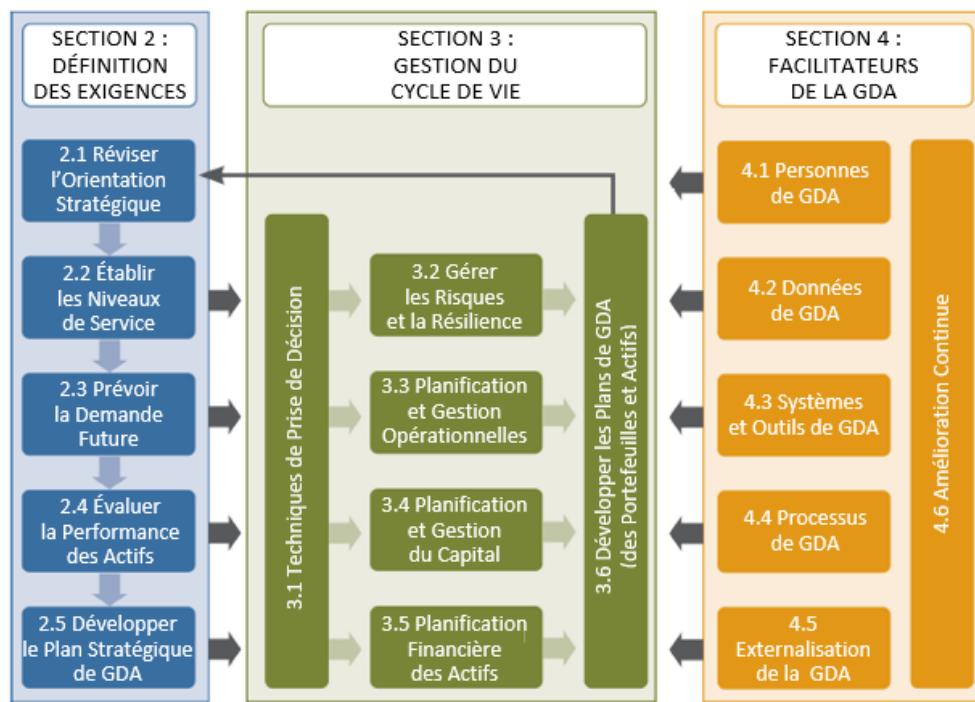


Figure 2-13: Diagramme de processus de l'IIMM (IPWEA, 2020)

- prise de décision et planification des stratégies du cycle de vie, pour élaborer les plans de GDA des portefeuilles;

- facilitateurs (internes et externes) supportant la décision et la planification efficaces, pour assurer des pratiques de GDA faisant l'objet d'une amélioration continue.

Ce modèle est un guide qui vise à compléter les exigences de la norme ISO 55001 de 2014 par l'applicabilité, et dispose d'un outil permettant une mesure de cette applicabilité par une autoévaluation. Les suppléments précédents relèvent l'importance des normes ISO 5500X pour faire la promotion des bonnes pratiques et non pas seulement pour un but de conformité, afin d'adresser des objectifs d'entreprises (performances ou résultats, et services améliorés, meilleures prises de décision informées, réputation, durabilité, etc.)

Les modèles conceptuels décrits précédemment sont cités comme des références (Shahid et al., 2016; Vahedi & Movahedi, 2018), et sont effectivement applicables dans plusieurs secteurs ou contextes, impliquant plusieurs catégories d'acteurs (IAM, 2015; Laue et al., 2014). Le Tableau 2-1 et le Tableau 2-2 : résument les caractéristiques de ces modèles. Si la conformité avec les normes ISO 5500X est établie pour certains modèles (GFMAM, 2014; IAM, 2015; Lemerande, 2018), la plupart favorisent une ouverture et une rétroaction (rétroaction) essentielles à l'amélioration, ou une possibilité de personnalisation des éléments de leurs modèles adaptés au besoin de divers secteurs (Lemerande, 2018; Shahid et al., 2016). Ces modèles, dont certains comportent des révisions, peuvent susciter alors un intérêt, un suivi ou un accompagnement, des interprétations particulières, ou comporter des priorités, pour divers secteurs en termes de guides ou références, de sources d'innovation. Selon l'IAM (2024), la modification des éléments d'un modèle retenu peut être nécessaire pour satisfaire aux besoins d'une organisation, de même que toute critique constructive constitue un motif pour une constante évolution. La perception de ces principaux modèles ou standards de GDA peut influencer ou impacter la conceptualisation pour les différents secteurs qui seront examinés par la suite.

Tableau 2-1 : Principaux modèles de GDA

MODÈLES CONCEPTUELS	ISO (2024a, 2024b)	IAM (2024)	Suite AMC (2014)	Suite IIMM IPWEA (2020)	ISAM AAMCoG (2012)	CIGRÉ (2010)	Brown et Humphrey (2005)	Suite PDAM EPRI (2020)
Principes	- Valeur - Alignement - Leadership	- Résultats - Réponse au Contexte - Alignement - Vie entière des Actifs - Culture et leadership	- Résultats - Capabilités - Assurance - Apprentissage (Alignement ISO)	- Cycle de vie - Rentabilité - Service - Risque - Durabilité	- Service - Gouvernance - Alignement - Durabilité - Responsabilité	- Prise de décision	- Valeur - Alignement - Leadership	- Valeur - Alignement - Performance des fonctions d'actifs
Concepts	- Harmonisation - Intégration - Approche systématique - Soutenabilité	- Valeur/Valeurs - Intégration - Discipline et Convergence - Capabilités	- Coûts, risques, performances - Critères de décision	- Objectif GDA/ Valeur (ISO) - Gestion de cycle de vie	- Intégration - Avantage collaboratif - Globalité	- Structure organisationnelle - Gestion du risque	- Gestion - Ingénierie - Information (Mutualisation)	- GDA de livraison d'électricité - Prise de décision
Description : contexte de l'organisation	PP	PP Externes	PP Organisation intégrée : buts, objectifs SGDA	PP : Client, Environnement Propriétaire, Organisation : vision, buts, ...	PP et environnement Gouvernement	Actionnaires, régulateurs, PP	PP, Propriétaire : valeurs, objectifs	PP, Propriétaire : buts, objectifs
	Organisation : objectifs, plans	Organisation: objectifs, plans			Organisations intergouvernementales : vision, mission ...	Propriétaire : stratégie de GDA		
	SGDA minimal intégré	SGDA standard intégré		Manager	SGDA intégré	Managers : tactique	Manager	Manager
SGDA (dimensions)	7 groupes 38 exigences	10 capacités 40 sujets		Fournisseurs de services		Fournisseurs de services : opération	Fournisseurs de services	Fournisseurs de services
Conformité	Autoévaluation avec ISO 55001 Guide IAM (2014) (39 questions)	GFMAM, ISO 55001	Cartographie avec GFMAM	Croisement avec ISO 55001 Autoévaluation (16 questions)	ISO 5500x	PAS 55, ISO	-	ISO 55001 et ISO 55002

Tableau 2-2 : Principaux modèles de GDA (suite 1)

MODÈLES CONCEPTUELS	ISO (2024a, 2024b)	IAM (2024)	Suite AMC (2014)	Suite IIMM IPWEA (2020)	ISAM AAMCoG (2012)	CIGRÉ (2010)	Brown et Humphrey (2005)	Suite PDAM EPRI (2020)
Visibilité	- Relation GDA, SGDA et Actifs - Focus: principes, résultats et bénéfices - Cycle de vie, maintenance (dispersion)	- Étendue de la GDA - Alignement - Chaîne de valeur - PDCA à 3 niveaux (cycle de vie, SGDA, organisation/capacités)	- PDCA - PP niveau haut et global - Processus de leadership	- Logique GDA - PDCI - Applicabilité d'ISO 55001 - Études de cas	- Logique GDA cumulative - Modèle hybride	- Focus : fonctions d'actifs et propriétaires du risque - 2 Processus : décision, exécution	- Focus: fonctions d'actifs reliées - Avec hiérarchie - Sans hiérarchie	- Focus : fonctions d'actifs générée - Avec hiérarchie - Modèle générique
Influences de l'organisation et de son contexte	Enjeux internes et externes, PP, SGDA et étendue, décision	Changement vs adaptation, engagement envers les PP, apprentissage	Capabilités, résultats, objectifs, demande (analyse)	Étendue, vision, buts SGDA, décision, cycle de vie, service	GDA et cycle de vie, collaboration		Approche/projet, performances, étendue GDA, perturbations	Buts et politiques de GDA, Performance
Nouvelles technologies ou impact	- Innovation vs bénéfices - Action prédictive	- Jumeaux numériques, BIM, IoT, ML, IA, drones, - Agilité, Décision ou alliance par le partage de données, risques, processus de gestion	- Changement vs révisions	- Changement / demande - GIS, échange de données, connectivité	- Évolution et changement - Service personnalisé	- Concepts, Qualité des données - Simulation, BDA	- BI, GIS, SCADA, automatisation	- Automatisation justifiée - Support de l'expertise
Secteurs (Et citations)	Tous (25)	Tous (13)	Tous (7)	Infrastructures (4)	Photovoltaïque, Éolien, Naval (3)	Électricité T et D (3)	Électricité T et D (2)	Électricité T et D (2)

2.2.2 - Modèles appliqués dans différents secteurs

Les modèles spécifiques sont en général restreints aux caractéristiques des actifs ou du secteur d'activité ; le point de départ concerne souvent le manque de publications, ou un aspect propre à un secteur n'ayant pas eu ou nécessitant une attention particulière en GDA (El-Akruti et al., 2018; Lima & Costa, 2019; Lonchampt et al., 2019; Roda & Macchi, 2018).

Dans ce sens, la production manufacturière nécessite un cadre de principes directeurs intégrant la GDA et conduisant à la décision (Roda & Macchi, 2018; Roda et al., 2016), avec un accent sur les risques (Suakanto et al., 2021) ; dans ce secteur, les PMEs recherchent une stratégie axée sur des facilitateurs supportant une nouvelle approche de GDA (Baglee et al., 2016), tandis que Benade (2015) suggère une adéquation de certaines disciplines avec la formation académique.

La prise de décision, et un cadre pour un environnement socio-culturel divers préservant la santé humaine et surtout complexe, préoccupent le secteur minier qui envisage une GDA spécifique (Adiansyah et al., 2015; Komljenovic et al., 2015).

Le secteur naval nécessite une GDA satisfaisant des contraintes d'intégrité territoriale, et impliquant plusieurs PP, l'acquisition de compétences en matière de gestion, et la perspective d'un environnement numérique (ou digital), en se référant au modèle AAMCoG (Lemerande, 2018).

Le secteur des infrastructures civiles en général (transport, construction, eau, installations, routes, etc.) nécessite des investissements lourds et des priorités de services publics assurés par les gouvernements, leurs agences ou les municipalités (Alkhuraissi & Alwohaibi, 2016; Glasson & Gibbons, 2015; Leitch & Ellsworth, 2016; Mohammadi et al., 2018). Les infrastructures sont un type d'actifs physiques qui consistent en des ensembles de « *routes* » reliant plusieurs utilisateurs ou entités et dont l'utilisation doit être négociée, et régulée par les gouvernements (Too, 2012; Wijnia & de Croon, 2015). Ces actifs doivent être accessibles à toute la communauté et en vue du développement durable (DIT, 2025; FCM, 2018), mais sont aussi évolutifs et comportent des

risques en termes d'importance et de complexité (Wijnia & de Croon, 2015). Les modèles ISO 55001, IAM, AMC et IIMM constituent les principales références.

Le secteur du pétrole et du gaz doit faire un choix raisonnable pour une GDA permettant d'assurer l'intégrité des installations affectées par le changement, et utilisant des méthodes appropriées pour l'évaluation des modèles conceptuels (El-Akruti et al., 2018; Vahedi & Movahedi, 2018).

Le secteur ferroviaire prône une GDA commune à toutes les organisations concernées (International Union of Railways [UIC], 2016), en conformité avec les normes ISO 5500X, et structurée par une information connectée, mais caractérisée par sa complexité (Hocking & Sproston, 2018).

Pour le secteur des technologies et services de l'information (TSI), l'importance des données, informations et connaissances dans le domaine des affaires, justifie l'intégration de l'IA/ML pour l'amélioration de la GDA et du cycle de vie (Mattioli et al., 2020).

Le secteur de l'électricité est concerné par une segmentation qui repose sur l'interconnexion de ses composantes, production, transport, distribution (Komljenovic et al., 2016; Malcón et al., 2015; Wardani & Naswil, 2017). La production nucléaire, avec des enjeux divers de sécurité, est prise en charge par le modèle conceptuel Risk-Informed Asset Management [RIAM] d'EPRI (2002) dans le cadre du Nuclear Asset Management [NAM]. Ce modèle axé sur la profitabilité et la valeur à long terme connaît une évolution grâce à la recherche et l'implication du modèle global Risk-Informed Decision-Making [RIDM] de prise de décision informée du risque (Komljenovic & Abdul-Nour, 2015; Komljenovic et al., 2019). Les restrictions imposées aux énergies fossiles pour des raisons de santé, de sûreté, de sécurité et d'environnement ([SSSE], et incluant la SST) impliquent une GDA intégrée de la filière thermique (Baxter & Pandey, 2016), et favorisent l'émergence des filières des énergies renouvelables (Leitch & Ellsworth, 2016; Rinaldi et al., 2017; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016). Toutes ces filières, le transport et la distribution s'appuient sur plusieurs références (AAMCoG, 2012; AMC, 2014; Brown & Humphrey, 2005; CIGRÉ, 2014; IAM, 2015; IPWEA, 2015), ou sur les modèles BSI et

ISO (Biard & Nour, 2021). La fiabilité accrue du transport et de la distribution pour la qualité de service et la réglementation concernent des modèles souvent axés sur le cycle de vie, ou la maintenance des transformateurs (Alvarez et al., 2019; Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; Malcón et al., 2015; Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019; Shen et al., 2016; Vermeer et al., 2015; Wardani & Naswil, 2017). Le CIGRÉ (2010), par la prise en compte des risques dans la décision, la gestion des données et des informations sur les actifs et leurs systèmes, précieuses pour son modèle de décision et accessibles par un mécanisme de transition «*intelligent hub*» (CIGRÉ, 2014), soutient de façon active les réseaux d'électricité. L'EPRI (2020) y participe également par l'implémentation des bonnes pratiques de GDA. Une coordination du secteur est possible et indispensable (Bosisio et al., 2019; Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; Lonchampt et al., 2019; Seow et al., 2016). Une plus grande considération est accordée aux risques pour les infrastructures (Wijnia & de Croon, 2015), mais ceux d'événements rares et extrêmes [ÉREs] sont moins perçus (Komljenovic et al., 2016; Shen et al., 2016). De plus, les recherches se concentrent plus sur le transport et la distribution que sur la production.

Selon leur intérêt pour les principaux modèles conceptuels, ces divers secteurs optent donc pour des modèles partiellement adaptés ou représentatifs des références, par exemple le modèle de la figure 2-14, (qui se rapproche de celui de l'IAM (2015)) ou pour des modèles



Figure 2-14 : Système de support de la GDA basé sur l'IA (Mattioli et al., 2020)

novateurs (Glasson & Gibbons, 2015; Komljenovic et al., 2016) qui prennent en compte des normes ISO 5500X et peuvent être appliqués dans plusieurs secteurs.

2.2.3 - Les aspects méthodologiques

Pour faire face à différentes préoccupations, les organisations ont recours à des modèles ou cadres qui les guident dans l'élaboration de stratégies en faveur de la gestion de processus ou items principaux (actifs ou réseaux, technologies, activités, compétences, priorités, etc.), et dans l'évaluation des systèmes de GDA.

Selon Peterson (2006), les aspects de complétude et d'utilité, caractérisant un « bon modèle » de GDA et conduisant au succès dans la compétition, sont basés sur une méthode qui inclut tous les aspects nécessaires du contexte de l'organisation comportant un grand ensemble de systèmes complexes et interreliés. Ces aspects sont intégrés et optimisés au sein d'un processus à trois fonctions – Diriger (système de gestion assurant alignement, discipline et utilité de l'ensemble, planification stratégique, gestion de l'information), Exécuter (développement de capacités, production, gestion de la santé des actifs physiques, et logistique en soutien aux deux précédents éléments), et Faciliter (appropriation, développement et renforcement de l'humain en rapport avec le changement). Ce processus systématique d'un modèle de GDA stratégique futuriste peut être décomposé ensuite en sous-modèles visant l'excellence opérationnelle par l'amélioration continue.

Laue et al. (2014) notent l'importance de la GDA, et des modèles servant de support aux organisations, mais également de moyens pour jauger cette gestion. Ces auteurs soulignent l'importance d'un point de vue stratégique de la GDA pour une approche globale intégrée comportant les dimensions temporelle (cycle de vie et horizons), organisationnelle (concernant la structure, l'humain et l'information) et spatiale (incluant les facteurs environnementaux et la collaboration). L'objectif est de présenter cette approche pour développer un modèle de maturité de capacités qui combine lesdites dimensions, ainsi que leurs interrelations et interactions concernant les actifs physiques, les facteurs internes et externes de l'organisation, selon une perspective Humain-technologie-organisation

interdépendants influençant la GDA par la durabilité. De plus, les aspects du contexte sont nécessaires à l'implémentation des modèles dans un cadre collaboratif (El-Akruti et al., 2018; Komljenovic et al., 2019; Laue et al., 2014).

Selon Germán et al. (2014), le contexte de sécurité, mais également social et environnemental acceptable implique plusieurs méthodologies de références servant de guides pour une GDA excellente dans les services publics de l'électricité. Quatre sont d'un intérêt particulier pour les actifs physiques, et décrites par ces auteurs, notamment celles d'EPRI de 2008, du CIGRÉ de 2010, du PAS 55-1 de 2008, et de l'ISO 55001 de 2014. Cet aspect du contexte est important à définir pour un souci de cohérence (Parlikad, 2019), fondée sur des théories facilitant l'évaluation des modèles conceptuels par des méthodes structurées (Brown et al., 2014; El-Akruti et al., 2018; GFMAM, 2014; IAM, 2015; Laue et al., 2014; Mahmood et al., 2015; Roda & Macchi, 2018).

Moradkhani et al. (2014) relèvent la nécessité d'une stratégie de GDA guidant la maintenance dans la distribution électrique pour la réduction des coûts, et des interruptions qui affectent les consommateurs finaux à la suite des défaillances des lignes aériennes, qui constituent des systèmes complexes à grande échelle, pouvant nécessiter la réparation ou le remplacement de certaines composantes. L'objectif est de modéliser le taux de défaillance pour mesurer la fiabilité améliorée par la performance de la maintenance préventive, permettant d'éviter ces interruptions et de contrôler cette fiabilité à travers les risques et les coûts durant le cycle de vie des systèmes. Les auteurs proposent un cadre de gestion de maintenance basé sur le modèle stratégique des trois fonctions : propriétaire, gestionnaire, et fournisseur de services d'actifs. Le gestionnaire est responsable de la détermination du taux de défaillance des systèmes et composantes afin d'allouer des ressources en maintenance de manière optimale, minimisant le coût total. Si en théorie cette méthode est satisfaisante, toutefois l'acquisition et la qualité des données doivent être précisées. De plus, le niveau de fiabilité doit être mis en évidence en rapport avec les coûts et les risques pour cette stratégie de GDA en considérant les valeurs indiquées par

le propriétaire d'Actif selon la Figure 2-15 afin de parvenir à une évaluation, constituant un accent en GDA selon Laue et al. (2014), ou comme préconisé par IAM (2015).

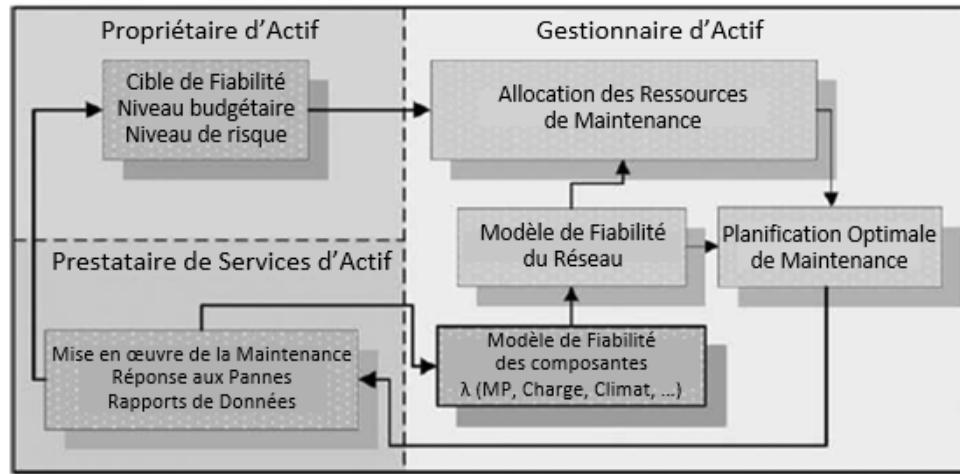


Figure 2-15 : Cadre de maintenance basée sur une stratégie de GDA (Moradkhani et al., 2014)

L'étude de Vahedi et Movahedi (2018) sur les modèles d'excellence (IAM, Asset Integrity Management [AIM], Life Cycle Engineering [LCE], Uptime) relève l'importance d'une évaluation et d'une priorisation multicritères d'un modèle de GDA, en vue du choix, dans un contexte de compétitivité. Les décisions prises et les résultats des actions posées doivent permettre de juger de la pertinence de ce choix; l'objectif est d'évaluer et de prioriser des modèles d'excellence, et d'identifier leurs capacités sur la base de critères à partir de techniques de décision. Six critères sont retenus, dont quatre provenant de la norme ISO 55000 de 2014 (coût, risque, performance et durabilité), et deux d'interviews d'experts du secteur pétrole et gaz (simplicité et connaissances). Les modèles sont retenus en fonction de leur habileté à adresser la gestion d'actifs physiques [GDAP] selon la norme précédente, et sont évalués en fonction des critères et du contexte de fonctionnement de l'organisation (valeurs, sensibilité à certains critères). Les résultats révèlent que les connaissances et le coût sont les critères, respectivement, de grands et de faibles impacts et sont une influence du secteur ou du contexte.

Konstantakos et al. (2019) relèvent plutôt une approche partielle, par le développement de cadres de GDA basés sur des pratiques organisationnelles particulières, ou par des

compréhensions spécifiques d'experts, d'une discipline pourtant étendue, à la nature stratégique, indépendamment du contexte. Des corps de connaissances établis sont nécessaires pour fournir des cadres d'une GDA plus mature, notamment par la normalisation (implémentée et interprétée selon le contexte). Ces cadres peuvent ainsi suppléer ceux qui sont considérés par El-Akruti et Dwight (2013) comme incomplets (concentrés sur des phases spécifiques du cycle de vie sans les interfaces) ou fondés sur la théorie de la gestion stratégique n'incluant pas tous les facteurs liés à la GDA et sa nature collaborative, comme le mentionnent également Roda et Macchi (2018). Par contre, en exploitant cette nature collaborative, Komljenovic et al. (2019) appliquent leur modèle du RIDM pour suppléer les limites d'une évaluation des risques, en considérant tous les facteurs influents dans un contexte de prise de décision complexe en GDA.

Cités comme des références, notamment pour le secteur de l'électricité, les modèles BSI (2008a) et ISO 55001 (IAM, 2015) favorisent l'intégration de l'optimisation du cycle de vie et la décision basée sur le risque (Biard & Nour, 2021). L'ISO, par les normes 5500X, influence les développements récents, favorisant un certain consensus et une conformité pour différents domaines d'activités (Konstantakos et al., 2019). L'IAM propose un guide d'autoévaluation sur 39 questions pour la conformité avec l'ISO ; les prescriptions du modèle ISO sont ouvertes, comme standard minimum d'un système de GDA et non une finalité selon l'IAM (2015), dont l'applicabilité doit être reconnue (Konstantakos et al., 2019). IPWEA (2020), dans son supplément, vient combler ce besoin en fournissant des références croisées entre l'ISO 55001 de 2014 (abrogé en 2024) et l'IIMM, de même qu'une autoévaluation sur 16 questions en rapport avec ce dernier est accessible.

Pour faciliter l'échange et l'harmonisation des connaissances et des savoir-faire, le GFMAM, en alignement avec les normes ISO 5500X, présente des caractéristiques des modèles conceptuels retenus de manière consensuelle (GFMAM, 2014), et décrit également un système de GDA à l'aide de groupes d'éléments adoptés par IAM. La version révisée de 2024 compte sept thèmes (contexte et PP, gouvernance, planification de la GDA, leadership et personnel, données et informations, livraison, réalisation de la

valeur), répartis en 40 sujets, « *reconnus mondialement, permettant l'harmonisation, la comparaison et le contraste des bases de connaissances, des pratiques, des évaluations de maturité, des systèmes de compétences et des qualifications dans ce domaine* » (GFMAM, 2024). Par le développement de ces sujets, cette version doit permettre de répondre aux nombreuses pressions sociétales actuelles (croissance démographique, complexité des portefeuilles d'actifs, avancées technologiques, demandes croissantes des clients, évolution des concepts de valeur, besoins en matière de développement durable, adaptation au changement climatique, résilience, risques et opportunités émergentes) face à l'urgence d'adresser la vulnérabilité (actifs, chaîne d'approvisionnement, clientèle) et les attentes des actionnaires (GFMAM, 2024).

Le Tableau 2-3 présente une certaine convergence des modèles conceptuels de GDA, à partir des années 2014 et 2024 (texte en couleur rouge ou verte) comme une avancée en termes de conformité, d'alignement, d'évaluation. L'application des normes ISO 5500X n'étant pas toujours liée à la révision de modèles, l'abrogation ou non de versions précédentes de différents modèles, et l'introduction de nouvelles initiatives représentent des défis dans la conceptualisation en GDA pour les divers secteurs.

Toutefois Benade (2015) reprend le terme « arbitraire » utilisé par le GFMAM dans sa version de 2014 sur la désignation des groupes, n'étant pas fondé sur une théorie scientifique, et du fait que la maintenance ne soit qu'un des éléments de la GDA. Cette analyse résulte du passage en revue de quatre disciplines (GDA et maintenance, gestion de la technologie, ingénierie des systèmes, gestion en ingénierie). L'accent des organisations est davantage mis sur les technologies (existantes ou nouvelles), en rapport avec les contenus de ces disciplines (fondamentaux, standards, corps de connaissances et pratiques professionnels), devant permettre de rester compétitives et créer de la valeur. La variété de ces contenus qui rendent les disciplines complexes, ainsi que les lacunes et les chevauchements observés, posent des défis (compréhension, intégration, mise en œuvre de stratégies) aux organisations. Par une recherche exploratoire, l'auteur procède à une investigation (théories, modèles, points communs, duplications, lacunes), qui vise à

Tableau 2-3 : Convergence des modèles conceptuels en GDA

MODÈLES CONCEPTUELS OU INITIATIVES	DATES DE RÉFÉRENCES ET NIVEAUX DE CONVERGENCE	
	2014	2024
MODÈLES DE RÉFÉRENCES ET SPÉCIFICATIONS PAS 55 (BSI)	2004, 2008 (abrogation versions 2004), participation BSI, IAM pour les organisations en GDAP	Retrait officiel en 2015 au profit des ISO 5500X de 2014, mais toujours cités ou exploités par les organisations en GDAP
MODÈLES DE RÉFÉRENCES ET NORMES ISO		5500X (2014, 2018) pour tous les types d'actifs
Modèles de regroupements (ou Panorama) GFMAM	2011	2024 Alignement ISO, participation IAM, AMC
AUTRES MODÈLES DE RÉFÉRENCES		
AMC	2006, 2007, 2009, 2011	2014 (conformité ISO, alignement GFMAM)
IPWEA (IIMM)	2000, 2002, 2006, 2011	2015, 2020 (conformité, application, évaluation ISO)
EPRI	RIAM, 2002	PDAM, 2020 (conformité ISO)
IAM	2011	2014, 2015 (conformité, évaluation ISO, alignement GFMAM), 2022 (intégration économie circulaire) 2024 (extension version 2022, conformité ISO, alignement GFMAM)
Brown et Humphred	2005	
CIGRÉ	2010 (conformité ISO / Risques)	application ISO en 2019
AAMCoG	2001, 2012	application ISO en 2014
INITIATIVES	I 4.0 2011	I 5.0 2021
MODÈLES DE DIVERS SECTEURS : défis dans la conceptualisation		

clarifier, à la fois pour les milieux professionnel et éducatif, les différentes disciplines (logique définissant les contenus, démarcation, etc.). La GDA, dont la tendance actuelle est à l'intégration, est en croissance rapide et importante pour les infrastructures durables, mais la théorie ou le modèle sont à expliciter. Cette recherche contribue à la création d'un modèle mental (comme point de départ d'une analyse et d'une comparaison de manière structurée), et à une capacité améliorée.

Cette tendance actuelle de la GDA à l'intégration selon l'auteur précédent (Benade, 2015) rejoint les points de vue d'autres acteurs :

- ✓ L'intégration de plusieurs standards et systèmes de management tout en considérant la complexité, du reporting lié à différentes approches de la valeur et à diverses exigences contemporaines, de la hiérarchie des actifs physiques, d'activités au cours du cycle de vie complet (IAM, 2024; ISO, 2024a), reposant sur un système de GDA.
- ✓ L'intégration dans son approche, pour adresser les problèmes multi-dimensionnels interdépendants (Gaha et al., 2021; GFMAM, 2024; IAM, 2022, 2024; ISO, 2024a). En premier lieu vient le développement durable (empreinte carbone, limites des ressources naturelles, responsabilité sociale, etc.), et dont la réponse se fonde sur les critères environnementaux, sociaux et économiques (triple performance). Ensuite viennent les perturbations (crises, catastrophes, interruptions, conflits, etc.) avec leurs risques, et dont la réponse se fonde sur le critère de gouvernance incluant la résilience. La soutenabilité peut être étendue aux organisations ou aux actifs (ISO, 2024a), de même que la résilience (IAM, 2024). Le besoin d'analyses et de plans de résilience (ou de contingences) régulièrement testés et maintenus, vise la continuité du service, par la préparation, la réponse, le rétablissement et l'adaptation, pour faire face à un événement adverse, et concerne surtout les infrastructures critiques et sociales, notamment dans le secteur de l'électricité (Gaha et al., 2021; IAM, 2024). Ces plans requièrent la mise en œuvre de solutions diverses telles que la redondance, les investissements d'amélioration ou de réduction des risques, les mécanismes de protection, l'innovation (ou « *futureproofing* ») (Gaha et al., 2021; IAM, 2024).

La recherche sur une GDA intégrée se penche également sur la théorie des systèmes :

- ✓ **Les systèmes d'actifs physiques** : ces systèmes sont représentatifs de la technologie (capital fixe d'une entreprise) permettant de produire des biens et des services, dont l'essor provient de la première révolution industrielle (mécanisation au 18^e siècle) et la seconde (électrification en 1870) (Gamache, 2019; Jemai et al., 2023; Rojko, 2017). Un système industriel ou technique, à la base, est un ensemble structuré de constituants et composantes en relation permettant de remplir une fonction. La revue de littérature de Petchrompo et Parlikad (2019) fournit des définitions et une classification exhaustive des catégories d'actifs physiques (actifs multi-composantes, flottes et portefeuilles) indiquant leurs caractéristiques (types de dépendances, classes de décisions, méthodes de résolutions). L'enjeu repose sur la cohérence de la terminologie utilisée dans plusieurs secteurs, en rapport avec la maintenance. Se basant sur la théorie générale des systèmes, la notion de structure des systèmes d'actifs physiques correspond à celle de hiérarchie décrite par Simon (1962) pour aborder la complexité. Cette notion peut être comprise comme un partitionnement en liaison avec les relations existantes entre composantes ou sous-systèmes, sans nécessiter de lien de subordination ou de proximité spatiale. Les recherches de cet auteur (sur les types de systèmes complexes et leur structure), et celles du Santa Fe Institute (SFI) fondé en 1984, figurent parmi les fondamentaux sur la science de la complexité (Bale et al., 2015; Jemai et al., 2023; Komljenovic et al., 2016; SFI, 2024). Les systèmes d'actifs physiques sont aujourd'hui constitués de plusieurs éléments en interaction, non de manière simple (par leurs lois linéaires ou non), dont les propriétés d'ensembles ne peuvent être déduites de façon triviale, « *le tout étant plus que la somme des parties* » (Simon, 1962). Le comportement non-linéaire (interactions riches, et dynamiques, pouvant inclure compétition, haut niveau d'interdépendances, et coopération entre éléments) exhibé par ces systèmes, et difficilement prédictible, conduit à les qualifier de complexes (Ahmad et al., 2024; Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016). Ce comportement peut affecter la maintenance (coûts, ÉREs tels que les pannes majeures ou l'abandon de projets de remise à neuf, complexité des modèles, opacité, risques

cachés dus aux incertitudes épistémiques importantes) des systèmes d'actifs physiques réparables (Komljenovic et al., 2016). Tout en essayant de trouver des réponses aux problèmes posés par ces systèmes, la théorie de la complexité prend en compte des disciplines impliquées, ou est intégrée dans les modèles (conceptuels ou élaborés) selon cette perspective (Bale et al., 2015; Katina et al., 2021; Komljenovic et al., 2016; Simon, 1962).

- ✓ **Les systèmes d'actifs physiques en symbiose avec les technologies de l'information et de la communication (TIC)** : les TIC sont issues de la troisième révolution en 1969 introduisant l'électronique et l'informatique (Gamache, 2019; Jemai et al., 2023; Rojko, 2017), permettant la numérisation (Reid & Cook, 2016), et l'automatisation. Ces technologies et leurs systèmes (identification et capture de données, systèmes de localisation en temps réel, etc.) sont désormais accessibles pour répondre au besoin crucial d'ensembles d'informations pour la gestion (phases du cycle de vie, prise de décision, stratégies) des actifs physiques (Ouertani et al., 2008). Selon Simon (1962), l'information entre dans les relations entre éléments d'un système, et peut aussi constituer une rétroaction de l'environnement du système (théories de la cybernétique et de la systémique). Ce mixage des systèmes d'actifs physiques et d'informations débouche sur des systèmes automatiques, ou des réseaux interconnectés tels que les systèmes électriques (topologie maillée, coopération entre producteurs pour améliorer leur exploitation, capacités de secours mutuel entre exploitants). Ces systèmes sont complexes par la présence des productions centralisée et distribuée, la dimension de leurs réseaux, leurs aspects organisationnels (Bosisio et al., 2019; Liboni et al., 2018; Lonchampt et al., 2019), leurs dynamiques sociales et technologiques (Bale et al., 2015).

Les systèmes d'actifs physiques, enveloppés dans les systèmes sociotechniques : selon la théorie sociotechnique [TS] (développée comme un défi face à l'implantation de la technologie dans les organisations minières vers les années 1950), les individus travaillent comme des systèmes d'agents intelligents en synergie avec la technologie (Kaminski, 2022). La

- ✓ Figure 2-16 : Dimensions ou sous-systèmes sociotechniques (Kaminski, 2022) illustre les différents sous-systèmes qui constituent ainsi un système sociotechnique ouvert,

situé et opérant dans leur environnement, et conduisant à un nouveau paradigme organisationnel, supportant une qualité de vie élevée au travail pour tous les employés. Les individus et la technologie (Trist, 1981),

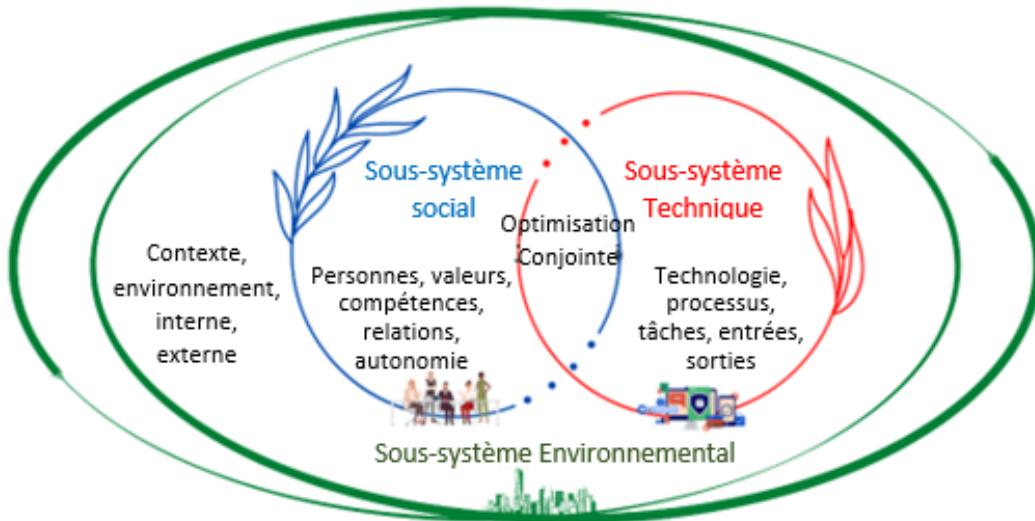


Figure 2-16 : Dimensions ou sous-systèmes sociotechniques (Kaminski, 2022)

sont deux composantes qui doivent être intégrées (avec leurs caractéristiques : contradictions et complémentarité), en considérant la perspective de la TS du système de travail de nature complexe. Une troisième composante est également importante, les processus, notamment l’optimisation conjointe comme préconisée par la TS pour garantir le succès (Trist, 1981), et d’autres processus déjà impliqués contribuant à un système de GDA global efficace (cycle de vie, prise de décision, évaluation des risques et prise de conscience par les individus, amélioration continue, management de la SST, etc.) (BSI, 2008b). Selon Vom Brocke et al. (2021), le point de vue axé sur les processus, « *séries cohérentes de changements* », pour comprendre les dynamiques des réseaux sociotechniques, avec les objectifs et les perspectives préconisés par la science des processus [SdP], doit être privilégié, par rapport à celui qui est axé sur « les choses ou objets » ou sur les systèmes, ou encore sur la structure de l’organisation (Antalová et al., 2022). La SdP, émergente, est définie comme « l’étude interdisciplinaire du changement continu » (Vom Brocke et al., 2021). Son point de

vue doit permettre une réconciliation « *des méthodes, théories et approches de divers domaines scientifiques* », ou leur combinaison « *(fertilisation croisée)* » (Vom Brocke et al., 2021). Selon ces auteurs, beaucoup de phénomènes fondamentaux de notre époque témoignent de dynamiques complexes impliquant le changement (climat, mondialisation, mouvements sociaux, décisions politiques, etc.) pouvant conduire à un apprentissage en les percevant comme des processus. S'appuyant sur les développements précédents (Kaminski, 2022; Trist, 1981; Vom Brocke et al., 2021), l'intégration des personnes, des processus et de la technologie dans leur environnement, permet de mieux appréhender les interactions et changements qui impactent autant le système de travail, les organisations, ou la société.

- ✓ **Les Systèmes d'actifs physiques, pris dans le contexte d'organisations :** les organisations évoluent dans un environnement de flux, caractérisé par des incertitudes (Katina et al., 2021). Selon Pellerin et al. (2019) ces organisations font face à deux exigences : la compétitivité, qui est la conquête des parts de marché en affrontant la concurrence (voir Figure 2-17), et l'agilité, permettant de s'adapter en permanence dans un environnement volatile, incertain, complexe et ambigu [VICA] (voir Figure 2-18).
- Ainsi, les systèmes d'actifs physiques, de plus en plus sophistiqués, sont ouverts, pour interagir avec divers éléments et autres systèmes de cet environnement, formant des systèmes plus complexes.



Figure 2-17 : Compétitivité (Pellerin et al., 2019)

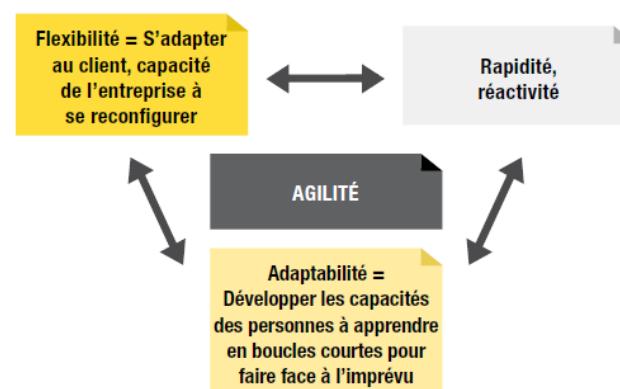


Figure 2-18 : Agilité (Pellerin et al., 2019)

Dans le domaine de l'énergie particulièrement, ces systèmes sont constitués d'agents au sens d'acteurs (foyers, organisations de PTDEs, gouvernements, fournisseurs, régulateurs, etc.), d'objets (technologies et infrastructures, réseaux où circule l'information), en interaction dans leur environnement (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018). Les organisations contemporaines qui correspondent à la description précédente sont qualifiées de systèmes adaptatifs complexes [SACs] (complex adaptive systems [CAS]) et possèdent des caractéristiques diverses, tant au niveau des systèmes qu'au niveau des agents (Ahmad et al., 2024; Bale et al., 2015; Jemai et al., 2023; Komljenovic et al., 2016), dont la synthèse est illustrée sur la Figure 2-19.

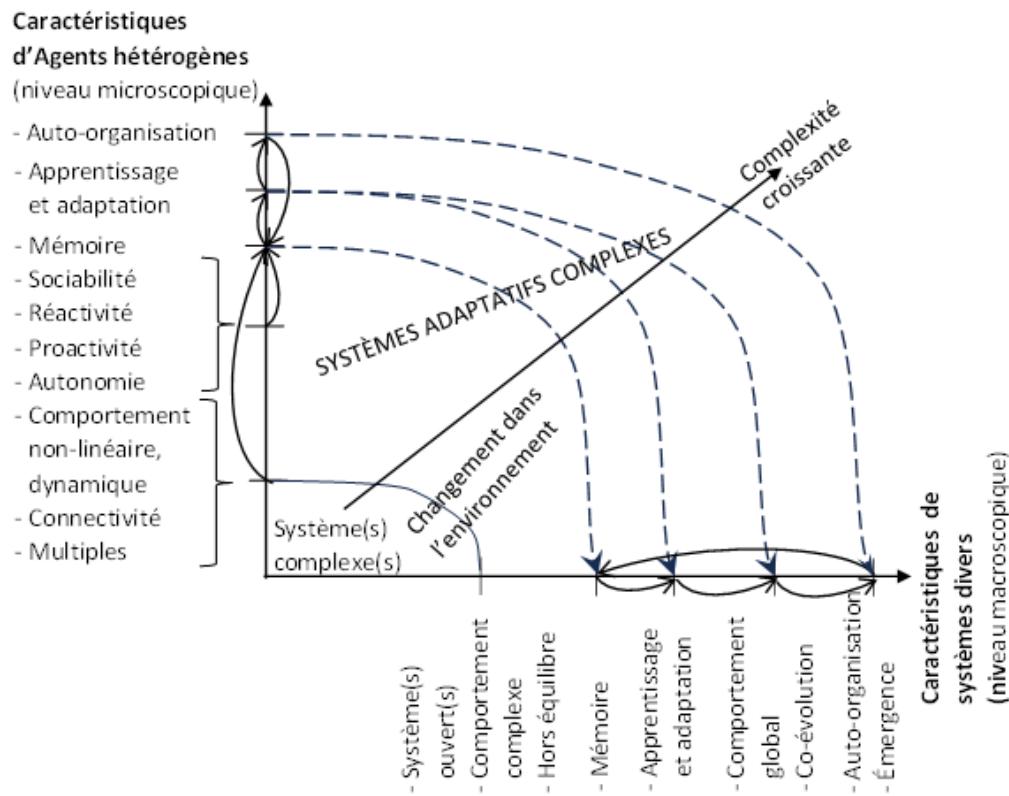


Figure 2-19 : Synthèse des aspects de la complexité

La satisfaction des exigences de compétitivité et d'agilité va de pair avec la nécessité d'une transformation en révisant les modèles ou théories d'organisations, pour tendre vers l'organisation apprenante qui intègre prioritairement le changement et s'y adapte constamment (Antalová et al., 2022; Pellerin et al., 2019). Selon Antalová et al. (2022), le

concept de l'organisation apprenante, du domaine de la théorie de la gestion, a été élaboré vers les années 1990 par Senge. Son ouvrage indique les caractéristiques de cette organisation (complexe de systèmes humains, orientée processus, importance de la rétroaction, etc.), de son système d'apprentissage en rapport avec son système de gestion global, et ses cinq disciplines fondamentales (Senge, 2006, cité dans Antalová et al., 2022, pp. 28 - 29). Décrise « *comme une organisation dans laquelle les individus développent constamment leur capacité à atteindre les résultats souhaités, ... de nouveaux et vastes modèles de pensée sont développés, ... où les individus apprennent continuellement ensemble* », la mise en œuvre de cette organisation, au regard des différents modèles, définitions, approches et perceptions, pose des défis majeurs (Antalová et al., 2022). L'organisation moderne peut être orientée vers le type apprenante inspiré du modèle sociotechnique, ou vers d'autres modèles, parfois hybrides, favorisant le Lean (rationalisation des processus), la participation, la collaboration, les méthodes d'apprentissage, l'autonomie, etc., en symbiose avec l'introduction des nouvelles technologies (Pellerin et al., 2019). L'usage de ces technologies (BDA, IA, ML, simulation, etc.) est considéré comme l'une des principales solutions aux problèmes posés par le souci ou l'augmentation de la productivité en rapport avec la complexité des actifs physiques. En même temps, l'adaptabilité, impliquée par la complexité à laquelle les organisations font face relativement à leur environnement (interne ou externe, changements, transformations, interactions), est orientée vers un apprentissage supporté par des approches systémiques (Ansari et al., 2018; Antalová et al., 2022; Bale et al., 2015; Katina et al., 2021; Liboni et al., 2018; Pellerin et al., 2019).

Si la complexité et les incertitudes sont admises dans l'environnement opérationnel et des affaires, les pratiques concernant la modélisation (étape importante) sont basées sur des méthodes traditionnelles, des hypothèses simplificatrices ou des biais trop réductifs, des frontières d'étude ou certaines barrières pouvant s'avérer limitatifs pour une perspective holistique (constituants ou agents, interactions et rétroactions, contextes et interprétations) des systèmes et leur environnement, et pour l'apprentissage (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016; Liboni et al., 2018). Cette modélisation doit permettre

d'appréhender les transitions donnant lieu aux propriétés émergentes de ces systèmes, visant à doter les organisations de nouvelles capacités afin de faciliter la prise de décision et d'atteindre des objectifs de résilience, d'agilité, de stabilité, d'efficience, de robustesse, de sécurité, etc. (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018). Les recherches actuelles qui adressent la complexité privilégient des méthodes ou approches basées sur la pensée systémique (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018), ou appartenant à un « *cadre de gouvernance des systèmes complexes* » pouvant supporter la GDA en vue de réaliser la valeur (Katina et al., 2021).

La transformation numérique et les nouvelles technologies de l'I4.0 permettent de suivre et contrôler des actifs physiques, de collecter et partager en temps réel des données massives pouvant être transformées en informations profitables pour la conceptualisation qui vise les systèmes complexes. Puis des décisions éclairées peuvent être prises afin d'atteindre des objectifs et de gérer les risques par le changement de paradigmes introduits dans la GDA et ses modèles (Biard & Nour, 2021).

2.2.4 - Implications de l'industrie 4.0 et de l'industrie 5.0

L'I4.0 est considérée comme la quatrième révolution (Rojko, 2017), pour l'industrie par les nouvelles pratiques d'affaires, et les conséquences des nouvelles technologies (Silva et al., 2020). Ces nouvelles pratiques imposent des changements, notamment le passage des silos à une gestion transversale, de la planification traditionnelle de la maintenance basée sur les connaissances et l'expérience à une approche basée sur les données. Une GDA conséquente est caractérisée par l'intelligence technologique permettant d'interpréter les informations sur les actifs physiques et d'évaluer leurs performances en temps réel, en vue de la création de la valeur. L'intégration des technologies opérationnelles et de l'information (nouvelles et existantes), des personnes (utilisatrices), et des processus, se trouve plus renforcée dans le cas de l'I4.0 par une architecture appropriée devant supporter une GDA intelligente basée sur un réseau IoT. C'est une GDA qui incorpore le cycle de vie d'actifs physiques connectés (opérations, maintenance, contrôle, surveillance de la condition, investissements conséquents, etc. (El Bounjimi &

Abdul-Nour, 2021; Reid & Cook, 2016)), favorise une anticipation des risques de défaillances (Liboni et al., 2018) et le traitement des activités à haut risque en maintenance (Silvestri et al., 2020). Le partage des données et informations, ainsi que l'intégration précédente introduisent par conséquent de nouveaux risques associés aux technologies (Komljenovic et al., 2016).

Sjøbakk (2018) évoque les avancées de l'industrie 4.0 qui vont bouleverser les modèles des affaires et la chaîne d'approvisionnement traditionnels, et l'obligation de suivre la mouvance. Une stratégie d'organisation pour aborder le concept de l'I4.0 et rester compétitive est un impératif, pour éviter une perte du marché, des investissements technologiques de manière ad hoc, etc. Face à diverses opinions, l'objectif de l'auteur est de faire une synthèse, en utilisant une méthode basée sur l'étude de 32 rapports publics en termes de positivisme pour la résolution de problème, et qui porte sur l'approche d'une stratégie de transformation vers l'I4.0, et la proposition, dans le panorama élaboré selon la Figure 2-20, d'un alignement entre deux écoles de pensée. Selon l'auteur, le numérique

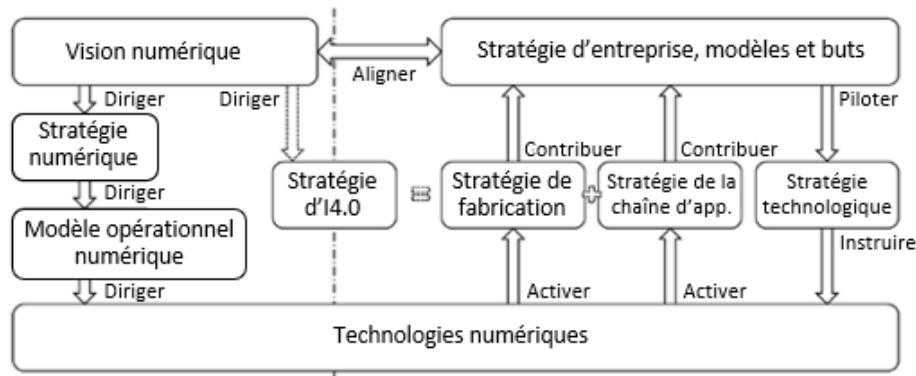


Figure 2-20 : Panorama stratégique de l'Industrie 4.0 (Sjøbakk, 2018)

comporte un caractère critique pour la compétitivité. Ce cadre pourrait être exploité dans le contexte de la GDA sous l'I4.0, et l'alignement proposé peut nécessiter d'autres investigations (acceptabilité, applicabilité ou portée).

Trindade et Almeida (2018) relèvent l'importance de l'alignement des stratégies de GDA et de transformation numérique par l'I4.0 en contexte pour renforcer la réalisation de la valeur. À partir d'une enquête et des questions de recherche sur la stratégie de

transformation numérique axée sur la GDA, les auteurs visent à indiquer les impacts de ce processus de transformation, en supposant une approche de la technologie en rapport avec le facteur humain et une GDA holistique, intégrée et flexible. Une combinaison entre technologies opérationnelles et technologies de l'information est donc essentielle, tout comme une convergence entre les technologies numériques perturbatrices en GDA. La difficulté à prédire le futur dans le cas d'une approche rapide qui favorise le remodelage de la transformation numérique, et la compréhension du contexte changeant qui nécessite un engagement constituent des points essentiels pour les résultats.

Silva et al. (2020) adressent la problématique d'un cadre systématique de connaissances et d'analyse du concept de l'I4.0. L'objectif visé est la synthèse des relations entre les caractéristiques, les technologies, les produits et les modèles d'affaires. Les nouvelles pratiques d'affaires et les impacts des nouvelles technologies dans l'industrie impliquent une innovation dans des modèles perturbateurs (écosystème, technologies, environnement, organisations) et des processus. Le concept d'écosystème issu de ces nouvelles pratiques inclut davantage de PP dans l'environnement d'une organisation par le partage, de quantités importantes de données et informations en vue de la création de la valeur, résultant d'une transition vers les systèmes, produits ou services intelligents constituant l'environnement de l'I4.0, pour en avoir le contrôle global. Une discussion entre les risques associés à l'I4.0 et les opportunités s'avère pertinente.

Liboni et al. (2018) se préoccupent de la gestion des changements relatifs à l'I4.0 et l'atteinte des objectifs d'exploitation durable pour l'industrie des systèmes électriques ; leur étude vise à relever les défis sur la protection de l'environnement et la sécurité des processus, et les capacités nécessaires pour soutenir la nouvelle révolution industrielle. Leur question de recherche conduit à une approche exploratoire et à une méthode de construction de connaissances pour l'aide à la décision, selon l'hypothèse de pratiques modernes basées sur un modèle conceptuel du service public intelligent de l'électricité. La transformation envisagée est fonction des exigences de l'I4.0, du contexte, de la collaboration, des spécificités, de la pensée systémique, d'un système de GDA structuré,

etc. Les lacunes de gestion peuvent être comblées par des modèles possibles contribuant à la modernisation des services publics d'électricité.

Pour la distribution électrique, Islam (2016) soulève l'enjeu de la criticité des systèmes numériques et technologies de l'information pour l'atteinte des objectifs du réseau intelligent. L'auteur présente certaines applications de la technologie numérique et indique leur utilité pour la distribution électrique, en supposant que l'intégration des technologies et des ressources est indispensable pour l'étape de la transformation numérique, afin de parvenir à un état souhaité, offrant de meilleures performances (efficience, fiabilité, facilité d'exploitation, etc.).

Pour adresser les enjeux de la transformation imposée par les changements dans le secteur public de l'électricité en vue de la réalisation de la valeur en GDA, Reid et Cook (2016) décrivent une approche de GDA basée sur la mise en œuvre (plateforme et architecture) des actifs connectés intelligents pour accroître les capacités en maintenance. Ces changements concernent les modèles d'affaires, l'orientation vers le service client, la modernisation du réseau électrique, l'introduction des énergies renouvelables et leur stockage, et le déclin des sources d'énergie fossile, mais également l'avancée dans la technologie impliquant les 9 piliers de l'I4.0 et offrant une capacité d'apprentissage. Cette avancée est une opportunité permettant de faire face aux précédents enjeux, en combinant les capteurs et les outils de traitement des données aux actifs critiques de PTDEs et en formalisant le concept de la surveillance intelligente (incluant le diagnostic) essentielle à une stratégie basée sur la maintenance conditionnelle. Cette stratégie, ainsi que l'intégration des personnes, le processus et les technologies, la disposition des préalables à l'I4.0, la prise en compte de la criticité des actifs, des risques et d'une structure de coût sont les éléments incorporés dans l'approche pour parvenir à une GDA efficace.

Selon Zhang et al. (2020), le concept de gestion du cycle de vie constitue le moyen d'amélioration et de développement de celui des actifs de la distribution électrique, et est conditionné par l'évaluation des capacités de cette gestion, aspect qui est absent de la recherche. Les principes permettant de construire un système de gestion et de garantir un

cycle de vie entier doivent être systémiques (système d'évaluation reflétant les éléments et caractéristiques principaux du niveau de GDA du secteur), assurant la matérialité (indicateurs représentatifs sans redondance), et la disponibilité des données (combinaison d'informations qualitatives et quantitatives). Le modèle du système d'évaluation des capacités de gestion du cycle de vie proposé, qui est associé à la prise de décision et doit aider au développement durable et sain des entreprises du réseau électrique, adresse deux principaux aspects fournissant plusieurs indicateurs. Le premier aspect porte sur l'amélioration de la qualité et de l'efficience qui mesure l'effet de la gestion actuelle du cycle de vie. Le second aspect concerne l'amélioration des capacités du processus de gestion et de contrôle du cycle de vie qui mesure les effets de ses activités, diagnostique et identifie les maillons faibles, ainsi que les problèmes de conception inadéquate. Le modèle proposé permet une amélioration, mais comporte encore des écarts par rapport au niveau international qui nécessite une expertise plus étendue, au-delà des limites d'une seule organisation.

Dans le même domaine, Sandu et Samii (2021) considèrent une stratégie de GDAP et de maintenance conditionnelle impulsée par les principes, les préalables et les technologies de l'I4.0 en faveur de l'implémentation du réseau intelligent, et comme source d'avantage concurrentiel en misant sur la durabilité. Leur étude vise à identifier les effets favorables de l'I4.0, pour l'exploitation, et pour la maintenance par la surveillance intelligente de l'état, selon l'hypothèse de la contextualisation de l'I4.0, justifiant la maintenance conditionnelle comme solution à l'infrastructure vieillissante. Cette gestion est adaptative et intègre les actions des PP pour un système énergétique significatif et plus durable.

Dans le domaine de la maintenance, selon Silvestri et al. (2020), le contexte de l'Industrie 4.0 qui a accentué la complexité et les dynamiques des processus et des produits, implique une transformation sur les plans technique et social, et dans les responsabilités de l'opérateur. Sur le plan technique, cet opérateur 4.0 doit disposer de compétences et des capacités nouvelles en support aux processus. L'usage de la réalité augmentée et des assistants virtuels améliore le contrôle et l'exécution en maintenance, et par l'analyse des

données massives acquises, la prise de décision et la prédition d'évènements pertinents, tandis que le travail collaboratif avec les robots et l'interaction avec les SCP conduisent ainsi à la réduction du taux de panne. La supervision, par un système de surveillance, nécessite un accès aux informations, considérant l'augmentation de leur quantité et leur complexité. Sur le plan social, les changements apportés par l'I4.0 requièrent une capacité d'adaptation rapide aux innovations digitales et à la maintenance 4.0, et la considération des interactions entre l'humain et les SCP ou les robots notamment dans les tâches en maintenance. La prise en compte de ces interactions rejoue la pensée sociotechnique considérant la symbiose entre humain et automatisation, et peut nécessiter une adaptation et une formation spécifique pour éviter l'externalisation de la maintenance faute de personnel qualifié.

Ansari et al. (2018) soulignent la tendance des SCP sociaux à intégrer l'informatisation et ses interconnexions, les processus physiques (interactions machines – actifs physiques) ainsi que les caractéristiques humaines et sociales (interactions caractérisées par l'expérience et l'apprentissage), au sein de l'I4.0, résultant en une transition de la coopération à une active collaboration humaine - SCP de production. Cette collaboration implique des rôles et des responsabilités ne pouvant être définis de manière indépendante, mais une complémentarité ou comparaison (en termes de coût, flexibilité, capacité, variation de la performance, variation de la qualité) dans les processus de résolutions de problèmes. Ainsi les niveaux de compétences humaines et le degré d'autonomie des SCP de production ensemble dérivent une capacité supplémentaire et un apprentissage réciproque par l'interaction. L'étude de cette complémentarité est effectuée dans le cadre de la maintenance 4.0 pour un problème de remplacement concernant un système complexe, afin de déterminer la répartition des tâches entre le personnel et les SCP de production selon le niveau de maturité de la solution visée et le contexte (complexité, risques et compromis à faire, approches à implémenter, etc.). Le niveau optimal de la collaboration entre humain et systèmes reste donc d'actualité.

La complexité et la pression, mais aussi les avantages introduits par le contexte de l'I4.0 qui impactent les écosystèmes et les opérateurs, exigent une adaptation rapide aux nouvelles technologies, une transition facilitée vers leur utilisation pour adresser la résistance au changement et réduire le risque d'une implémentation nocive et non profitable (Silvestri et al., 2020). L'introduction des nouvelles technologies favorise également la mise en œuvre d'une capacité d'apprentissage (Reid & Cook, 2016). Xu et al. (2021) justifient l'initiative de l'I5.0 en faisant remarquer que l'I4.0 se concentre moins sur les principes de l'équité sociale et de la durabilité, et mènent une investigation sur la coexistence de ces deux initiatives, dans le but de déterminer le paysage occupé et leurs intersections par une approche sociotechnique. Selon Breque et al. (2021),

« L'industrie 5.0 reconnaît le pouvoir de l'industrie d'atteindre des objectifs sociétaux au-delà de l'emploi et de la croissance pour devenir un fournisseur résilient de prospérité, en faisant respecter dans la production les limites de notre planète et en plaçant le bien-être du travailleur industriel au centre du processus de production. »

Ce concept est destiné à mobiliser activement la recherche et l'innovation comme leviers pour supporter une industrie pourvoyeuse d'un service à long terme pour l'humanité, dans l'optique de l'utilisation des technologies avancées dans toutes les sphères d'activités et adaptées à chaque citoyen (Breque et al., 2021). Aussi, l'I5.0 aborde les défis liés à son implantation (acceptation et perturbations probables, mesure de la création de valeur, intégration de chaîne de valeur entière, recherche interdisciplinaire et complexité, innovation orientée vers l'écosystème, etc.) par une approche systémique comportant trois éléments fondamentaux :

- ✓ l'humain au centre (investissement et non un coût, besoins au cœur du processus de production, adaptabilité de la technologie, lieu de travail inclusif et sécuritaire, etc.) ;
- ✓ la durabilité (respect des limites de la planète, processus circulaires impliquant les ressources naturelles) ;
- ✓ et la résilience (production d'un niveau élevé de robustesse, armée contre les perturbations).

et implique six technologies facilitatrices (IA, jumeaux numériques et simulation,

technologies bio-inspirées, interaction humain-machine, technologies pour une énergie efficiente, traitement des données). Le but ultime est le progrès sociétal, et surtout la création de valeur pour toutes les PP (économie, écologie, société) par une transformation de la technologie (Breque et al., 2021; Xu et al., 2021). Le parcours des organisations dans l'I4.0 avec son accent sur la haute technologie et ses solutions pour stimuler l'économie, est désormais jalonné d'une grande considération des éléments fondamentaux de l'I5.0 rappelant les besoins de la société et la responsabilité (Xu et al., 2021). La soutenabilité et la résilience qui se renforcent autour de l'humain mis au centre des processus selon l'I5.0, participent donc à l'intégration de personnes, des processus, des technologies, et vont conditionner leurs interactions, mais plus généralement celles des SACs.

Avec une telle avancée et une omniprésence de l'I4.0, une I5.0 émergente promotrice de valeur et de responsabilité, peut nécessiter un réajustement ou une redéfinition des buts du parcours dans l'I4.0 (Xu et al., 2021). En considérant ce dernier aspect, et en revenant sur le rôle des modèles mentaux indiqué par Benade (2015) ou préconisé pour une organisation apprenante (Senge, 2006, cité dans Antalová et al., 2022, pp. 28 - 29), un autre questionnement rejoint celui de Biard et Nour (2021) fondé sur les méthodes et les modèles actuels de GDA au profit de l'implémentation de l'I4.0 dans l'industrie électrique. Par une revue de littérature, ces auteurs présentent une analyse des différents modèles de GDA (cycle de vie, décision, risques, etc.), ainsi que les applications possibles de l'I4.0, notamment l'IA favorisant le traitement des données massives pour la prise de décision. La contribution de l'I4.0 est pertinente, selon l'hypothèse de l'application d'un modèle de GDA intégré à l'ensemble des composantes du secteur, ou à la chaîne de valeur entière (Biard & Nour, 2021), rejoignant également l'accent de l'I5.0 (Xu et al., 2021). De plus, ce secteur repose sur des organisations, des actifs physiques et des processus (cognitifs, opérationnels ou intentionnels mis en œuvre par l'humain, ou naturels, et leurs influences mutuelles), répartis sur de larges échelles, dont les études, les dynamiques existantes, et la traçabilité ne peuvent pas être effectives manuellement (Reid & Cook, 2016). Cependant, l'utilisation pervasive des nouvelles technologies, des données du contexte et de sources complémentaires (observations par exemple), offrent des

opportunités d'ouverture et de recherche à plusieurs disciplines pour la compréhension et la prédition du changement dans les phénomènes à plusieurs niveaux (Vom Brocke et al., 2021). Des prescriptions ou des interventions informées sur les processus peuvent être faites, ou une conception peut être élaborée, par anticipation, suivant un plan et un objectif déterminés; une telle démarche vise l'utilité et le développement de connaissances pour la découverte de profils dans le changement, la résolution de problèmes ou l'innovation (Vom Brocke et al., 2021).

2.3 - Synthèse de revue de littérature

La revue de littérature met en lumière plusieurs concepts plus ou moins impliqués dans la conceptualisation en GDA pour tous les secteurs gouvernementaux ou de l'industrie. Ces concepts (cycle de vie, intégration, organisation apprenante, résilience, durabilité, agilité, économie circulaire, complexité, chaîne de valeur, etc.) sont capables d'influencer la perception des modèles conceptuels, en considérant les théories sous-jacentes (qui nécessitent plusieurs efforts dans leur élaboration), les révolutions industrielles (I4.0, I5.0, etc.) et la nécessité d'une transformation des organisations modernes considérées comme des SACs. Leur environnement VICA est caractérisé par un écosystème numérique, des sources multiples de données et divers types de risques. La synthèse de cette revue dans le cas de l'industrie peut se résumer par la Figure 2-21, pour laquelle l'intégration.

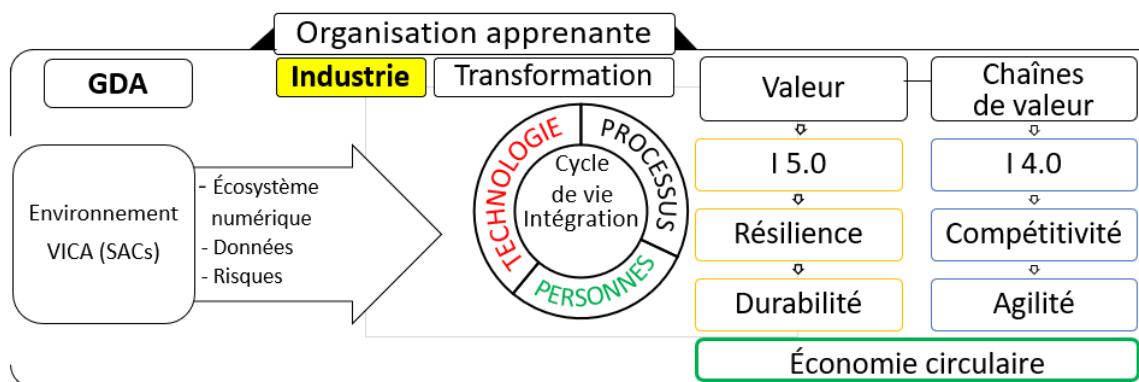


Figure 2-21 : Synthèse sur les organisations modernes en GDA dans l'industrie

personnes, processus et technologie est centrale, considérant leurs interactions, de même que leur cycle de vie, et qui doivent être pris en compte dans la conceptualisation en GDA.

Cette synthèse de revue de littérature conduit à l'élaboration d'une matrice.

2.3.1 - Matrice de revue de littérature

Cette matrice, constituée de l'ANNEXE A - , fournit de façon concise, les éléments pertinents des documents consultés ayant fait l'objet d'une analyse critique, et conduisant à élaborer la démarche de la recherche. Les documents additionnels sont indiqués dans la liste des références.

2.3.2 - Diagramme d'Ishikawa

Plusieurs variables indépendantes, sans prétention d'exhaustivité, ont été identifiées dans la revue de littérature à partir de la matrice ci-dessus, notamment pour le secteur électrique comportant différentes composantes, dont les particularités peuvent conduire à considérer ou détailler d'autres variables. Le diagramme, illustré par la Figure 2-22, est élaboré pour donner un aperçu du regroupement et de la synthèse des variables indépendantes par les catégories Concepts et exigences, Contexte de l'organisation, Apport des acteurs, Spécificités, et Apprentissage, qui permettent par la suite d'établir le cadre de recherche, et la méthodologie.



Figure 2-22 : Diagramme d'Ishikawa

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

Ce chapitre présente le cadre conceptuel retenu à la suite de la revue de littérature, et décrit la méthodologie utilisée pour atteindre l'objectif de cette recherche.

3.1 - Cadre conceptuel

Ce cadre est un outil de travail permettant d'organiser les concepts, les différents types de variables et leurs relations, ainsi que les hypothèses à retenir, pour mieux spécifier la problématique, afin de servir dans une analyse conformément à la méthodologie établie.

Le modèle de recherche illustré par la Figure 3-1 représente, de façon générale, la relation qui existe entre les catégories de variables indépendantes (concepts et exigences, Contexte de l'organisation, Apport des acteurs, Spécificités, et Apprentissage) et la variable dépendante (conceptualisation en GDA) expliquée par les précédentes, moyennant les hypothèses (H1 à H5), et sert de référence dans l'élaboration de la méthodologie.

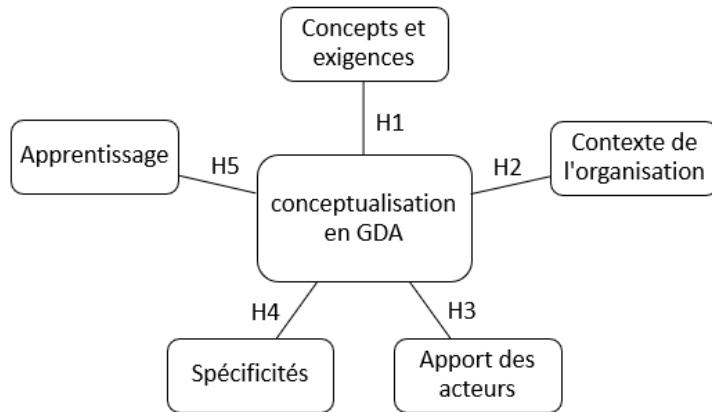


Figure 3-1 : Modèle de recherche

Pour faciliter le traitement relatif aux variables, les hypothèses de recherche qui figurent sur le modèle précédent et qui sont détaillées par la suite sont des propositions de réponses retenues pour servir de guides dans la démarche de résolution de la problématique posée.

H1 : un modèle conceptuel intègre plusieurs concepts et leurs exigences qui encadrent tous les aspects subséquents (GFMAM, 2024; IAM, 2024). Une approche intégrée qui respecte les principes de GDA, a pour but d'éviter une gestion (d'activités,

de fonctions, de processus, de capacités) de manière isolée ou additive, et de favoriser un cadre global et une coordination de différentes disciplines (IAM, 2024; ISO, 2024a).

H2 : un modèle conceptuel définit les éléments du contexte de l'organisation et leurs interactions (GFMAM, 2014). Ces éléments participent, de manière cohérente, à la conception du SGDA et de son étendue ; ce SGDA peut être complexe et évoluer afin de correspondre aux besoins du contexte (IAM, 2024; ISO, 2024a, 2024b).

H3 : l'apport des acteurs est un atout pour la mutualisation des compétences dont l'acquisition ne peut être perçue en silos, mais par une expertise transversale pour soutenir la mise en œuvre d'une stratégie globale de GDA (Brown & Humphrey, 2005). Cet atout se base sur la collaboration dans le contexte actuel des organisations (Shahid et al., 2016).

H4 : les spécificités justifient la démarcation des modèles pour certains secteurs, notamment celui de l'électricité, qui fait face à une difficulté de stockage, et comporte plusieurs composantes, mais aussi diverses filières de production mises en compétition (Liboni et al., 2018; Lonchampt et al., 2019).

H5 : un modèle conceptuel doit garantir une ouverture des systèmes d'industries, qui favorise l'apprentissage de l'environnement des organisations (Liboni et al., 2018) qui évolue et est complexe. Cet apprentissage est en étroite relation avec l'acquisition des connaissances et d'un comportement, et favorise à la fois la capacité de réaction et la compétitivité (AMC, 2014; Lim et al., 2016).

3.2 - Étapes de la méthodologie

3.2.1 - Méthode de recherche

La conceptualisation en GDA, problématique de cette recherche, comporte plusieurs enjeux conduisant à l'élaboration d'un modèle, et nécessite une approche qualitative pour tenter de la comprendre, en rapport avec le changement (Brown et al., 2014; El-Akruti et al., 2018; Konstantakos et al., 2019; Roda & Macchi, 2018). Le but est de la décrire et l'expliquer en termes de résultat, à l'aide des modèles conceptuels analysés, à l'exemple de Shah et al. (2016) et Shahid et al. (2016) qui explorent des références et des standards

connus afin d'en élaborer de novateurs selon leurs perceptions (GFMAM, 2014). Ces modèles décrivent des systèmes d'évaluation de la GDA ou des décisions prises en fonction de leur choix (Vahedi & Movahedi, 2018), et l'objectif principal est d'en examiner la pertinence et la finalité, et la contribution à la valeur et à l'avancement de la discipline de GDA pour les organisations. Une contribution efficace nécessite l'exploration d'un cadre d'activités, de relations et de mécanismes, au sein d'une organisation (Konstantakos et al., 2019).

Aucune étude ou théorie n'existe sur ce sujet (El-Akruti et al., 2018; Konstantakos et al., 2019), et cette recherche exploratoire sur la façon de penser est axée sur la découverte dans le but de fournir un cadre d'analyse favorisant l'amélioration des modèles actuels. Par son originalité, cette recherche se concentre sur des aspects indispensables (contexte, cycle de vie des actifs et les risques associés, décision, système de GDA, etc.), qui permettent à une organisation d'être en conformité avec les nécessités ou contraintes de son environnement (Liboni et al., 2018; Lima & Costa, 2019).

La nature de cette recherche justifie le passage en revue de différents modèles conceptuels au 2.2 -, et sa démarche conduit à une investigation à l'aide des questions de recherche énoncées au 1.2 -, et qui nécessitent un examen critique de données à collecter de la littérature (Shah et al., 2016).

3.2.2 - Technique de collecte des données

L'examen par cette recherche de modèles conceptuels de GDA fait appel à une technique de collecte des données basée sur l'analyse documentaire, convenable à une approche qualitative, qui permet d'identifier et d'analyser des contenus (articles, standards, guides, livres blancs, etc.), et qui privilégie une revue de littérature systématique (RLS). La RLS constitue des données d'entrée à la place des mesures, des enquêtes, des observations, des questionnaires ou des interviews, dans le but de découvrir les pratiques les plus appropriées en GDA (Shah et al., 2016), ou les plus récentes ainsi que les lacunes (Shahid et al., 2016). Cette RLS a été effectuée en suivant les étapes suivantes :

- ✓ Recherche de documents, par une combinaison de termes dans les bases de données SCOPUS (selon les titres, résumés et mots-clés), et IEEE Xplore (selon toutes les métadonnées). La période de sélection des documents va de 2015 à 2021; le choix de l'année 2015 est consécutif à l'année 2014, date de référence correspondant à la publication des modèles et standards ISO 5500X, suivie de celle du panorama du GFMAM (2014) dans un but de conformité avec les standards précédents, tout comme la révision pour alignement dans la foulée de certains modèles de références tels que AMC (2014), IAM (2015), IIMM de l'IPWEA (2020) après celui de 2015 (Konstantakos et al., 2019), ou de l'article de Mahmood et al. (2015) comportant un regroupement des éléments de la GDA.
- ✓ Exclusion des documents n'ayant aucun modèle représentatif associé à la GDA, et des doublons. Seuls les modèles qui abordent la notion de cycle de vie, et dont les documents sont accessibles sans coût sont retenus.
- ✓ Inclusion, selon les critères précédents, de documents identifiés en consultant des listes de références, et recherche sur Google ou Google scholar.
- ✓ Sélection des documents comportant des modèles de divers secteurs, destinés à l'analyse.
- ✓ Identification des principaux modèles de GDA cités (au minimum deux fois) en références dans les documents précédemment sélectionnés, et recherche de documents additionnels dans les sites Google, Google scholar, ou web professionnels.

Seuls les modèles conceptuels provenant de divers secteurs sont analysés, pour apprécier les tendances et les développements observés, ainsi que l'incidence des normes ISO 5500x, et l'intérêt suscité par les modèles de références pour l'avancement de la GDA. Pour cette analyse, trente-quatre (34) documents ont été retenus (sans prétention d'exhaustivité).

Le Tableau 3-1 dresse la liste de ces documents, selon leur(s) auteur(s), année et secteur(s).

Remarque : les numéros sont affectés aux différents documents de manière aléatoire, et servent à les repérer ou référencer dans l'analyse effectuée au CHAPITRE 4 -.

Tableau 3-1 : Liste des documents : auteur(s), année et secteur(s)

N°	Auteur(s) et année	Secteur(s)	N°	Auteur(s) et année	Secteur(s)
1	Adiansyah et al. (2015)	Mines	18	UIC (2016)	Rail
2	Benade (2015)	Manufacturier/Études supérieures	19	DIT (2025)	Infrastructures publiques/Municipalités
3	Glasson et Gibbons (2015)	Infrastructures/Routes	20	Rinaldi et al. (2017)	Électricité/Courants marins
4	Komljenovic et al. (2015)	Mines	21	Wardani et Naswil (2017)	Électricité/transmission
5	Malcón et al. (2015)	Électricité/Transmission	22	El-Akruti et al. (2018)	Infrastructures publiques, industries de production
6	Vermeer et al. (2015)	Électricité/Réseaux	23	FCM (2018)	Infrastructures publiques/Municipalités
7	Wijnia et de Croon (2015)	Infrastructures/eau ; Distribution/Gaz, Électricité	24	Hocking et Sproston (2018)	Rail
8	Alkhuraissi et Alwahaibi (2016)	Infrastructures publiques/Bâtiments, installations	25	Lemerande (2018)	Naval
9	Baglee et al. (2016)	Manufacturier/PMEs	26	Mohammadi et al. (2018)	Infrastructures/Routes
10	Baxter et Pandey (2016)	Électricité, Gaz, Manufacturier	27	Roda et Macchi (2018)	Manufacturier/Industries
11	Komljenovic et al. (2016)	Électricité	28	Alvarez et al. (2019)	Électricité/Distribution
12	Leitch et Ellsworth (2016)	Infrastructures/eau, Hydroélectricité	29	Bosisio et al. (2019)	Électricité, Eau et Gaz/ Réseaux de distribution
13	Roda et al. (2016)	Manufacturier/Industries	30	Lima et Costa (2019)	Électricité/Transmission
14	Seow et al. (2016)	Électricité/Production et Transmission	31	Lonchampt et al. (2019)	Électricité/production et transformateurs
15	Shah et al. (2016)	Électricité/Photovoltaïque	32	Mohamed Yousuf et Abdulhalem (2019)	Électricité
16	Shahid et al. (2016)	Électricité/Éolien	33	Mattioli et al. (2020)	Technologies et services de l'information
17	Shen et al. (2016)	Électricité/Transmission	34	Suakanto et al. (2021)	Manufacturier/Industries

3.2.3 - Mode d'investigation

Le mode d'investigation retenu dans cette approche qualitative est la comparaison ; son aspect général consiste à présenter des différences ou des similitudes, et des avantages de certains cadres ou modèles conceptuels par rapport à d'autres (Konstantakos et al., 2019; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016). L'aspect critique, cependant, permet de relever des lacunes en termes de principes, d'interrelations entre éléments constitutifs, d'interdisciplinarité ou d'implémentation, à partir d'une démarche exploratoire basée sur un cadre ou modèle conceptuel hypothétique, afin de proposer une amélioration de l'existant ou une innovation (Adiansyah et al., 2015; Benade, 2015; Roda & Macchi, 2018). La comparaison peut aussi s'effectuer à l'aide de critères judicieusement choisis selon Vahedi et Movahedi (2018) et de méthodes multicritères de prise de décision dans un souci de priorisation. Le choix d'un modèle dans ce cas doit ensuite conduire à l'évaluation des impacts sur la GDA.

Dans cette recherche, une analyse critique et comparative des modèles est effectuée de manière originale, en utilisant comme critères les catégories de variables indépendantes identifiées dans le cadre conceptuel, en retenant l'hypothèse générale suivante : pour les besoins d'analyse, les documents analysés comportent des plateformes de renseignements pertinents sur ces modèles, et dont les éléments découlent des concepts identifiés.

Le critère d'analyse concernant les concepts et exigences de GDA, de l'I4.0 et de l'I5.0 repose sur la définition des principaux concepts élaborée au 2.1 -. Toutefois, de nouveaux concepts émergents sont évoqués dans la recension des écrits ou à partir des autres critères.

Les critères suivants permettent de répondre aux quatre questions de recherche déjà énoncées, et seront abordés dans le CHAPITRE 4 - réservé à l'analyse.

Critère d'analyse 1 : le contexte d'une organisation est la principale caractéristique de la pensée de départ de la GDA selon l'ISO (2024a, 2024b). Une approche de GDA selon la pensée systémique doit favoriser sa compréhension (Glasson & Gibbons, 2015), perceptible à travers un modèle conceptuel qui renseigne sur les éléments pertinents du contexte du système de gestion et la frontière (Seow et al., 2016), au niveau stratégique.

Critère d'analyse 2 : l'apport des acteurs de la GDA, dont l'aspect qualitatif est privilégié pour parvenir à l'opérationnalisation, sans restreindre leurs rôles particuliers, est sujet à un changement imposé par le contexte actuel des organisations (Brown et al., 2014). Ce changement conduit à une évaluation des développements d'une manière structurée (El-Akruti et al., 2018) qui renforce la collaboration.

Critère d'analyse 3 : les aspects spécifiques du secteur de l'électricité (criticité, diversité d'actifs physiques, de composantes) dépassent le cadre des fondations communes à divers secteurs, selon les défis actuels (globalisation, plusieurs PP et influences, environnement complexe, service intelligent de l'électricité, etc.). Ces défis doivent être adressés par une approche de GDA holistique et structurée (Liboni et al., 2018; Lonchampt et al., 2019).

Critère d'analyse 4 : l'apprentissage est perçu comme un processus favorisant l'interaction entre les éléments constitutifs d'un système ouvert et son environnement (Liboni et al., 2018). Ces éléments sont catégorisés, selon l'objectif principal du système (Liboni et al., 2018), ou selon la perspective de la complexité (Bale et al., 2015). De cet apprentissage résultent une adaptation, et une expansion de la GDA à travers plusieurs concepts (Liboni et al., 2018) ou propriétés (Bale et al., 2015) émergents, notamment pour le secteur de l'électricité.

CHAPITRE 4 - ANALYSE DES MODÈLES CONCEPTUELS

Selon l'ISO (2017), la valeur établie d'un point de vue organisationnel plus large en GDA ne doit pas être perdue, tandis que pour l'IAM (2015) une connaissance pratique est nécessaire. Cette analyse examine les documents sélectionnés selon les critères retenus dans la méthodologie pour répondre aux questions posées, en accord avec le concept qui est à l'origine de la GDA.

4.1 - Contexte de l'organisation en GDA

La norme 55001 (ISO, 2024b) insiste sur la « *compréhension de l'organisation et de son contexte* » comme première exigence du système de GDA. Cet aspect du contexte opérationnel et des affaires (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016) doit permettre de faire le lien entre l'objectif ou la stratégie envisagés (ISO, 2017) et un modèle pertinent de GDA comme étant la représentation d'un phénomène de l'organisation à analyser ou à évaluer (El-Akruti et al., 2018). Dans la littérature, le regroupement des éléments du contexte et leur dénomination sont variés (Benade, 2015; BSI, 2008a; Crespo Márquez et al., 2020; El-Akruti & Dwight, 2013; GFMAM, 2014; Komljenovic et al., 2016; Laue et al., 2014; Mahmood et al., 2015; Mattioli et al., 2020). Ces éléments interdépendants forment une structure organisée (de processus, fonctions, activités ou capacités) et de disciplines transversales prenant en charge les actifs physiques en relation avec les autres types d'actifs indispensables (BSI, 2008a; Komljenovic et al., 2016) contribuant à un haut niveau à la stratégie de l'organisation. Ce contexte se décrit, selon la nature, le but et la portée de l'organisation, par le contexte extérieur, le contexte intérieur et la frontière (Bale et al., 2015; Crespo Márquez et al., 2020; El-Akruti & Dwight, 2013; FCM, 2018; Glasson & Gibbons, 2015; IAM, 2015; ISO, 2024a, 2024b; Komljenovic et al., 2016; Laue et al., 2014; Seow et al., 2016). Cette description peut être visible sur les modèles (exemples (AAMCoG, 2012; Glasson & Gibbons, 2015; IAM, 2015)), ou implicite et contenue dans une plateforme du modèle (selon l'hypothèse générale indiquée au 3.2.3 -).

Le contexte extérieur comporte les éléments de l'environnement (social, physique, économique, culturel) externe de l'organisation avec ses besoins, attentes, influences ou

contraintes (financières, réglementaires, etc.), permettant d'identifier les entrées et sorties reliées à la réalisation de valeur.

Le contexte intérieur renferme les éléments de l'organisation (attentes, besoins, politique et stratégie, principes, valeurs ou culture) et du système de GDA (processus, activités, fonctions, capacités) avec leurs interactions pour contribuer à la valeur.

La frontière (ou l'interface) délimitant les contextes extérieur et intérieur est définie par les éléments qui assurent leur connectivité et indiquent la portée, la vision et les valeurs de l'organisation, l'agrégation des risques, et les sphères d'influence de l'environnement opérationnel et des affaires permettant d'identifier l'ensemble de ses facteurs, et les relations avec les entrées et les sorties.

Un nouvel aspect concerne la symbolique et les concepts de l'I4.0 liés aux nouvelles technologies, dans le contexte intérieur (collecte de données, surveillance, cycle de vie, gestion des risques et décisions multicritères de manière intelligente), et au niveau de la frontière (échange des données, informations et connaissances) : IoT et plateforme, GDA numérique ou intelligente, réseaux intelligents, infonuagique, organisation connectée, actifs physiques et produits ou services connectés, intelligents ou autonomes (Alvarez et al., 2019; El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Glasson & Gibbons, 2015; Hocking & Sproston, 2018; Lemerande, 2018; Malcón et al., 2015; Mattioli et al., 2020; Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019; Seow et al., 2016; Shahid et al., 2016; Shen et al., 2016).

Le Tableau 4-1 indique les principaux éléments relatifs à un haut niveau pour les documents analysés et les modèles concernés les plus représentatifs, référencés par leurs numéros (voir Tableau 3-1).

Tableau 4-1 : Répartition des documents selon les éléments du contexte et les secteurs

Éléments du contexte		Références des documents	
		Électricité	Autres secteurs
Contexte extérieur	Institutions (politique, législation, régulation, foncier, finances), investisseurs, média	10, 11, 14, 15, 16, 17, 20, 29	1, 2, 3, 4, 8, 12, 18, 19, 22, 23, 25
	Marchés de produits et services, agrégateurs, prosommateurs, commercialisation, agréments, compétition, benchmarking		
	Nouvelles technologies (marchés, expertise, veille, infonuagique)		
	Environnement social, naturel, climat, évènements rares, site (choix, préservation)		
	Clients ou usagers (satisfaction, attraction), réputation de l'organisation		
	Partenariat (fournisseurs, entrepreneurs, consultants, recherche, industries, praticiens, fonds)		
Frontière	Organisation/multi-organisations (agences) : Raison d'être, étendue, plan stratégique organisationnel , vision, mission, valeurs (durabilité, agilité , accessibilité, etc.), niveaux de service	10, 11, 14, 15, 16, 21	3, 4, 12, 13, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 27, 33, 34
	Connectivité, échange de données, informations, connaissances et écosystème	5, 32	24, 25
	Risques	Haut niveau ou agrégation, opportunités, sécurité	10, 11, 14, 31
		Résilience	4, 12, 23, 34
Contexte intérieur	Gouvernance (objectifs, politiques), leadership , stratégie et plans, standards, revue	6, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 28, 32	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 33, 34
	Organisation et personnes : compétences, culture, apprentissage, changement, SST		
	Information sur les actifs physiques, connaissances, capacités, communication		
	Prise de décision (demande, investissements, planification, délibération)		
	Intelligence (données, connaissances, performance), connectivité, intégration des technologies et Hub intelligent, plateforme IoT, AMI	5, 14, 16, 17, 32	3, 24, 33, 34
	Cycle de vie	actifs physiques, produits ou services	10, 11, 14, 15, 16, 17, 21
		connectivité, intelligence et autonomie	14, 17, 32
Contexte global		10, 11, 14, 15, 16	3, 4, 8, 12, 18, 19, 22, 23, 25

La Figure 4-1 synthétise graphiquement les données du Tableau 4-1 regroupant les documents analysés selon les éléments du contexte en GDA. La plupart des modèles se concentrent sur le contexte intérieur, avec une approche de cycle de vie, une frontière et un contexte extérieur souvent abordés de manière partielle.

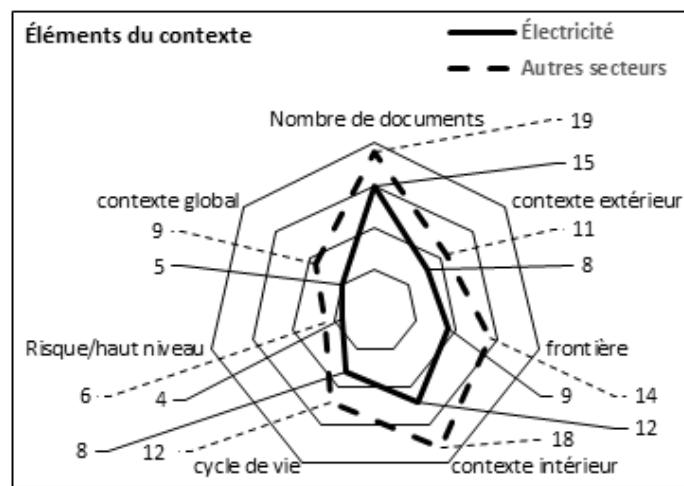


Figure 4-1 : Données (synthèse) des éléments du contexte

Les documents relevant à la fois du contexte extérieur, de la frontière et du contexte intérieur satisfont le contexte global, avec 4 sur 15 pour le secteur électricité, et 8 sur 18 pour les autres secteurs. La définition d'un modèle conceptuel (GFMAM, 2014; Peterson, 2006) implique une structuration de la GDA, favorisant la visibilité et la compréhension des items, de leurs relations en rapport avec les nouvelles technologies, par exemple pour les modèles de l'IAM (2015) et de Mattioli et al. (2020) en ce qui concerne la phase maintenance et la maintenance prédictive. Cette structuration concerne les rubriques suivantes :

- ✓ l'approche du cycle de vie, définie comme une « gestion rentable du cycle de vie des actifs » (IPWEA, 2015), ou une méthode structurée systématique favorisant une planification transparente et cohérente (Shah et al., 2016), et quelques indications :
 - chaque phase du cycle affectant les suivantes, la condition future des actifs et leur environnement (Shah et al., 2016; Shen et al., 2016; Wardani & Naswil, 2017);
 - approches partielles à éviter selon les exigences de la valeur (BSI, 2008a; CIGRÉ, 2014; EPRI, 2002; IAM, 2015; Khuntia et al., 2016; Komljenovic et al., 2016; Shen et al., 2016);
 - actifs physiques et produits ou services fournis associés (secteurs électricité, mines, etc.) pour réaliser la valeur (Komljenovic et al., 2015; Lima & Costa, 2019; Malcón

et al., 2015), et connectés (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Mattioli et al., 2020; Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019; Seow et al., 2016).

- ✓ la gestion de l'information, qui implique :
 - l'information comme support indispensable reliant tous les processus et les actifs dans la gestion (Hocking & Sproston, 2018);
 - une gestion proactive, selon l'I4.0, des données et informations sur l'état et les performances des actifs physiques (pour la prédition d'extension ou de fin de vie), et des compétences transversales (renforcement de capacités) en lien avec tous les types d'actifs et acteurs impliqués en GDA en vue de l'évaluation des performances.
- ✓ la prise de décision, définie comme un processus holistique visant l'optimisation « *processus d'établissement d'un compromis, parmi un ensemble de facteurs concurrents* », regroupant des dépenses, des réalisations à terme et la valeur (IAM, 2024). Ce processus ayant un sens (Bara et al., 2021), permet de parvenir à un équilibre des bénéfices des coûts, risques, opportunités et performances qui sont interdépendants (Komljenovic et al., 2016), et comporte plusieurs caractéristiques :
 - importance pour la vie des actifs et leur environnement (EPRI, 2002; Komljenovic et al., 2019);
 - plusieurs scénarios ou classes de décisions (Khuntia et al., 2016; Petchrompo & Parlikad, 2019) de cycle de vie et impacts à assumer par la gestion (Bara et al., 2021; CIGRÉ, 2014), « *en considérant les priorités conflictuelles, les compromis et en construisant un consensus* » (IAM, 2024);
 - renforcement par des connaissances basées directement sur leur source et de nouvelles approches basées sur les données (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021) dans le contexte de l'I4.0.
- ✓ la gestion du risque, avec des nuances dans la définition du risque (Adiansyah et al., 2015; ISO, 2014; Komljenovic et al., 2016; UIC, 2016), et notamment celui qui résulte du changement dans l'environnement (Komljenovic et al., 2016; Roda & Macchi, 2018; Shah et al., 2016). Le risque peut être exprimé par :

- une déviation d'une norme ou valeur limite pour une performance, ou d'une condition (CIGRÉ, 2010);
- un effet (écart) causé par l'incertitude sur les objectifs, l'incertitude étant « *l'état de manque d'information, de compréhension ou de connaissance relative à un évènement, ses conséquences ou sa vraisemblance* » (ISO, 2024a) et son impact sur l'organisation ou sa performance (Komljenovic et al., 2016);
- des dimensions incluant les objectifs ou cibles de performance assortis de tolérance de risque et les situations catastrophiques (Brown & Humphrey, 2005; Roda & Macchi, 2018), divers niveaux et agrégation (Wijnia & de Croon, 2015) pour la vision des organisations et la décision;
- des préoccupations et une prise de conscience sur de nouveaux types provenant de l'environnement opérationnel et des affaires, et favorisant l'émergence d'ÉREs (Komljenovic et al., 2016); certains résultent de l'échange de données (Lemerande, 2018; Malcón et al., 2015). Ces risques émergents nécessitent une surveillance et imposent aux organisations d'assurer leur durabilité, leur résilience et leur agilité (Gaha et al., 2021; GFMAM, 2024; Glasson & Gibbons, 2015; IAM, 2024; Komljenovic et al., 2016; Suakanto et al., 2021).

La GDA est une discipline qui se veut autonome par sa philosophie, et peut être renforcée au sein des organisations (BSI, 2008a; Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; UIC, 2016), en tirant profit des contributions d'autres disciplines ou stratégies telles que l'I4.0 (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Suakanto et al., 2021) selon le contexte. Cet aspect du contexte de l'organisation permet donc d'identifier les facteurs de son environnement, leurs influences et leurs interactions, en lien avec des savoirs, pouvant permettre de répondre aux préoccupations des organisations. La nécessité d'une réponse adaptée interpelle ainsi de manière cruciale les différents acteurs (Bale et al., 2015) au sujet de leur apport en GDA.

4.2 - Apport des acteurs de la GDA

L’apport des différents acteurs contributeurs de modèles conceptuels, qui ne se limite pas à l’aspect quantitatif par la représentativité (vue limitée), doit leur permettre de jouer un rôle proactif important (qualitatif) dans l’avancement de la discipline, et conduit à une répartition en trois principales catégories (AAMCoG, 2012; Bale et al., 2015; Brown et al., 2014; BSI, 2008a; El-Akruti et al., 2018; EPRI, 2002; FCM, 2018; IAM, 2015; Komljenovic et al., 2016; Konstantakos et al., 2019; Laue et al., 2014; Lemerande, 2018; Parlikad, 2019; Roda & Macchi, 2018; Too, 2012) :

- ✓ les chercheurs ou académiciens (catégorie a), qui se penchent sur la recension des écrits, le niveau des concepts et la construction des théories, et dont les modèles conceptuels (novateurs ou renforcés) peuvent guider vers l’opérationnalisation.
- ✓ les corps professionnels ou consultants (catégorie b), qui se chargent de la vérification des théories ou technologies par des retours d’expériences, et qui offrent par leurs modèles conceptuels ou standards, un service d’expertise, de transfert de connaissances, notamment pour conduire aux capacités et à la maturité sur la définition des plans d’action.
- ✓ les gestionnaires ou praticiens, des industries et agences diverses gouvernementales ou non (catégorie c), qui se chargent de l’application des théories ou méthodologies, des technologies vérifiées, et qui traduisent les développements en de meilleures pratiques encadrées dans les aspects relevant de l’organisation, des processus et des activités pour en faire des références.

Une autre catégorie est constituée d’acteurs pourvoyeurs de fonds ou d’un support dans le cadre d’un partenariat pour soutenir les initiatives des acteurs auteurs des documents analysés (Adiansyah et al., 2015; Alvarez et al., 2019; FCM, 2018; Komljenovic et al., 2016; Leitch & Ellsworth, 2016; Lima & Costa, 2019; Rinaldi et al., 2017; Roda & Macchi, 2018; Suakanto et al., 2021). Le Tableau 4-2 établit la répartition des documents analysés (selon les numéros de références du Tableau 3-1), en fonction des trois principales catégories d’acteurs et des secteurs d’activités.

Tableau 4-2 : Répartition des documents par secteurs et catégories d'acteurs

Secteurs	Catégories des acteurs et références des documents						Total
	a	b	c	a - b	a - c	b - c	
Électricité	15 ^a , 16 ^a , 17, 28 ^a , 30, 31, 32	6, 14	5, 21	20	11 ^a		13
Infrastructures publiques	26		8, 19			3, 23 ^{bc}	5
Mines	1 ^a , 4 ^a						2
Naval	25						1
Manufacturier	2, 9 ^a , 13 ^a , 27, 34 ^a						5
Rail		18, 24					2
TSI			33 ^c				1
Multiples	22 ^a			7	12*, 29*	10*	5

Les exposants ^a, ^b, et ^c indiquent que les acteurs proviennent de plusieurs organisations du même type ; par exemple, dans la catégorie a des chercheurs ou académiciens, 16^a indique que pour le document 16, les acteurs proviennent de plusieurs organisations de la même catégorie, tandis que pour le document 17, tous les acteurs proviennent d'une seule organisation de la catégorie a ; pour le document 11 des catégories a et c (notation a - c), les acteurs proviennent de plusieurs organisations de la catégorie a, et d'une organisation de la catégorie c des gestionnaires ou praticiens ; les exposants * indiquent que les documents traitent des secteurs multiples incluant l'électricité. Toutefois, cette répartition est insuffisante pour examiner l'apport des acteurs, et nécessite de faire des parallèles (contexte, autres références citées, sites des auteurs, etc.) avec les contenus des documents; le Tableau 4-3 suivant dresse la répartition des documents (en fonction de leurs numéros de références du Tableau 3-1) selon le cadre de la collaboration.

Tableau 4-3 : Répartition des documents par secteurs et cadre de collaboration

Cadre de la collaboration	Références des documents	
	Secteur Électricité	Autres secteurs
Recherche exploratoire	15, 16, 32	1, 2, 4, 9, 13, 25
Enquêtes / interviews	30	2, 9, 22, 27, 34
Méthodologies	6, 10, 11, 14, 17, 20, 21, 28, 29, 30, 31	2, 3, 12, 22, 23, 26, 27, 33, 34
Recherche / pratique	11, 17, 28, 29, 30, 31	2, 9, 12, 22, 25, 26, 27, 33, 34
Consultation / pratique	5, 6, 10, 14	3, 7, 8, 19, 23, 24
Recherche / consultation /	20	18
Expérimentation	5, 20, 17	
Études de cas / validation	6, 10, 11, 14, 21, 28, 29, 30, 31	3, 7, 8, 12, 18, 19, 22, 23, 26, 27, 33

D'après le Tableau 4-3, la recherche exploratoire concerne les chercheurs d'une ou de plusieurs organisations ou institutions dont les modèles conceptuels sont novateurs et hypothétiques. Les enquêtes ou interviews sont des opportunités de collaboration des chercheurs avec les praticiens ou experts de divers domaines pour la collecte de données, tandis que les méthodologies sont mises en œuvre en visant des aspects disciplinaires pour aboutir aux meilleures pratiques. Plusieurs acteurs sont concernés par la collaboration impliquant des praticiens ; toutefois l'étape de la validation de leurs modèles conceptuels n'est pas toujours franchie. Le cas du document 21 (Wardani & Naswil, 2017) est singulier, car ces praticiens du secteur de l'électricité ont besoin d'une implication de la recherche ou du conseil, par la nature interdisciplinaire et collaborative du système de GDA bénéfique pour l'approche de cycle de vie (El-Akruti & Dwight, 2013; Suakanto et al., 2021), qui pose des défis majeurs. Les modèles des documents 4, 15 et 16 de chercheurs (Komljenovic et al., 2015; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016), considérés comme satisfaisant le contexte global pour le critère précédent, sont de potentiels candidats à une collaboration avec le conseil ou la pratique pour franchir l'étape décisive de la validation.

La GDA préconise l'anticipation, et le retrait des silos dans les organisations, favorisant ainsi un changement par l'émergence d'un rôle collaboratif basé sur une approche collective ou intégrée pour obtenir un avantage collaboratif (Brown et al., 2014). Selon ces auteurs, la collaboration est un moyen permettant d'atteindre un but pour l'avancement de la discipline par un groupe collaboratif étendu à toutes les catégories d'acteurs. Cette collaboration présente de multiples avantages : efficience, cadre de partage favorable et de validation des modèles conceptuels, combinaison et complémentarité, développement de réseaux, réduction des approches fragmentées et structuration de la GDA (Bale et al., 2015; Brown et al., 2014; El-Akruti et al., 2018; Komljenovic et al., 2019; Laue et al., 2014; Parlikad, 2019; Too, 2012), croissance et apprentissage par l'interaction (Derrouiche & Neubert, 2013). Ce rôle proactif confirme l'humain comme facteur de création de valeur dans le contexte de l'I4.0 et de l'I5.0 (Liboni et al., 2018; Xu et al., 2021) et dans l'avancement de la GDA. L'IPWEA (2015)

indique que le développement du capital humain (ou capacité) permet la sensibilisation à un niveau approprié, et qu'une ressource humaine combine la capacité et la compétence, en accord avec l'objectif d'une connaissance pratique de la GDA (IAM, 2015). Ce concept de capacité inhérent au principe de garantie de la GDA (AMC, 2014), et celui de la maturité (Laue et al., 2014; UIC, 2016), concernent aussi bien le capital humain que les processus et les organisations, et sont le reflet de la démarche qui débute par la conceptualisation et conduit à l'opérationnalisation en GDA. Les standards qui se heurtent à des barrières (El-Akruti & Dwight, 2013), et notamment la terminologie diffuse, doivent être cohérents, compatibles et documentés pour réduire la complexité, favoriser les échanges et la communication entre acteurs, et l'évaluation de la recherche (Parlikad, 2019). Ainsi, ces acteurs ont la possibilité d'évaluer des modèles conceptuels à l'aide d'études de cas ou de contextes diversifiés (El-Akruti et al., 2018; Komljenovic et al., 2019; Roda & Macchi, 2018), pour en faire des références (DIT, 2025; FCM, 2018; Leitch & Ellsworth, 2016; Lemerande, 2018; Seow et al., 2016; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016) en gestion d'actifs physiques diversifiés, ou justifier la prise en compte de leurs spécificités.

4.3 - Démarcation ou spécificités du secteur de l'électricité

4.3.1 - Caractéristiques du secteur de l'électricité

Selon la littérature, le secteur de l'électricité peut être associé à d'autres réseaux (distribution gaz, eau) par une approche uniforme de haut niveau, tout en possédant à un niveau inférieur ses caractéristiques propres dues à la diversité de ses composantes (Bosisio et al., 2019). Par contre une démarcation des autres réseaux (assainissement, gaz) concerne la difficulté de stockage de l'électricité, le respect des politiques de régulation ou liées à l'environnement (Liboni et al., 2018), la constitution du mix énergétique par la mise en compétition de plusieurs filières de production ayant des spécificités posant des risques divers (Malcón et al., 2015; Rinaldi et al., 2017; Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016). Le cycle de vie (production, transport, distribution, et consommation/commercialisation) de l'électricité (Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; Malcón et al., 2015; Seow et al., 2016) est tributaire de la partition de ce

secteur. Cette partition, qui constitue des silos pour « *l'objectif global de la chaîne de production, transport et distribution devant fournir l'électricité aux consommateurs* », doit se confronter, selon les modèles choisis en lien avec l'une des composantes de ce secteur, à la révolution de l'I4.0 (Biard & Nour, 2021). Du domaine d'utilité publique (Bosisio et al., 2019; Lima & Costa, 2019), avec des défaillances visibles (Wijnia & de Croon, 2015), ce secteur fait face à un environnement caractérisé par diverses contraintes, une approche de cycle de vie intégrant plusieurs phases et leurs risques, des composantes d'actifs physiques coûteux, diversifiés, complexes, opérant sur de longues durées, et ayant un grand impact sur les organisations. La nature de ces actifs, leur vieillissement, leur évolution au sein de l'environnement complexe et de vastes marchés (électricité et besoins nouveaux, technologies) sujets à des changements ou perturbations parfois difficilement prédictibles, et la dépendance de plusieurs secteurs à l'électricité (criticité par les impacts des interruptions ou de l'exploitation sur l'écosystème), introduisent des incertitudes qui favorisent un grand intérêt pour les risques associés à la GDA et récurrents pour la décision et la maintenance (Alvarez et al., 2019; Bosisio et al., 2019; Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; Malcón et al., 2015; Seow et al., 2016; Shah et al., 2016; Shen et al., 2016; Vermeer et al., 2015; Wijnia & de Croon, 2015).

Le Tableau 4-4 suivant illustre divers contenus couvrant des aspects de la GDA et des risques pour le secteur de l'électricité. Plusieurs standards existent dans ce secteur, impliquant une compatibilité et une adéquation des connaissances, des ressources et du cadre organisationnel pour la GDA qui doit intégrer les risques présents dans toutes les activités (Komljenovic et al., 2016; Lima & Costa, 2019; Seow et al., 2016). Le vieillissement et la défaillance des actifs physiques constituent le centre d'intérêt de nombreuses organisations du secteur au sujet du risque d'interruptions, mais qui est relativement mineur selon Komljenovic et al. (2016), comparativement à celui des ÉREs, qui suscitent, comme d'autres domaines ou concepts associés au risque, une attention particulière selon le contexte. Deux principales approches de GDA intégrant le risque émergent. La première, plus usitée, de GDA qui est basée à la fois sur les risques liés aux actifs et les risques financiers (Risk-Based Asset Management [RBAM]), associés à

Tableau 4-4 : Aspects de la GDA et des risques pour le secteur électricité

1 – Standards	Références des documents	
ISO 31000, ISO Guide 73 : Management du risque	11, 28, 30	
ISO 55000, ISO 55001, ISO 55002 : Gestion d'actifs ; ISO 9001 : Qualité ; ISO 14001 : Environnemental ; ISO 22301 : Continuité d'activité	10, 11, 14, 15, 16, 28, 29, 30, 32	
CEN/CENELEC/ETSI : Normes pour les réseaux intelligents	5	
BS OHSAS 18001 : SST, AIEA No SF-1, AIEA 75-INSAG-3 rev.1 : protection (personnes, société et environnement) contre les rayonnements ionisants et dangers radiologiques	10, 11	
2 - Domaines ou concepts associés au risque		
Défaillance - vieillissement (réseaux électriques, courants marins) : risque de défaillance et interruptions, dilemme maintenance / remplacement, coût / risque, priorités maintenance /entreprise, plan /urgence	6, 14, 17, 20, 21, 28, 29	
Politique SSSE (thermique) : fonctions critiques et risques, facteurs de risque d'impact, risques opérationnels, évaluation des investissements, risques résiduels (faible probabilité et conséquences élevées)	10, 31	
Contrat d'achat - interaction climat et fiabilité (Éolien) : partage des risques (PP du contrat, référence pour les plans liés aux phases du cycle de vie), risque fonction de l'interaction	16, 31	
Changement de politique (solaire photovoltaïque) : appréciation des risques, surveillance de l'exposition au risque (phase du cycle de vie et plan en GDA)	15	
Gestion intégrée des initiatives (réseaux intelligents) : évaluation des risques, meilleur rapport coût-risque-performance	5	
Évènements extrêmes et rares en GDA (transmission, distribution, nucléaire) : environnement, risques nouveaux, perturbateurs, extension du concept, continuité d'activité / résilience, risque agrégé, impacts	11, 17	
Réglementation (transmission) : risques / vie des actifs, conformité, priorités et réalisation de la valeur, leadership et engagement, implémentation du risque et structuration des actifs (maturité)	30	
Nouvelles technologies (transmission) : anticipation et reconnaissance des sites et actifs à risque (IA), prévention / maintenance prédictive, prédiction et contrôle du niveau du risque en temps réel (IoT)	32, 17, 5, 14	
3 – Approches et outils		
GDA basée sur le risque (Risk-Based Asset Management [RBAM]), court, moyen ou long terme	Principe : assurance par le contrôle des risques en GDA Pratiques : déclencheurs internes (défaillance, vieillissement), santé / criticité, appréciation numérique, priorisation (entreprise ou maintenance) et décision	6, 14, 17, 21, 28, 32
RIDM : (GDA, ÉREs, complexité), moyen ou long terme	Principe : risque, composante parmi tant d'autres, qualitatives et quantitatives Pratiques : déclencheurs internes, externes (interruptions, changements et combinaison), analyses, interaction, jugement d'experts, décision/ délibération	11, 31
Prise de décision multicritère (multi-criteria decision-making [MCDM])	Principe : assurance par l'amélioration continue en GDA Pratiques : actif et valeur réglementaire, gestion conjointe et conformité, jugements d'experts, décision : structuration et priorisation (stratégie)	30
GDA centrée sur la fiabilité (Reliability centered asset management [RCAM]), intégrée, intelligente	Principe : appréciation du risque par la criticité et la santé des actifs Pratiques : évolution / RBAM, conception / stratégies (maintenance), données massives, intelligentes et prédiction de défaillance (temps réel), IA/ML/décision	14

chaque phase du cycle de vie pour réaliser la valeur, atteindre des objectifs, et améliorer le système de gestion, et qui sert de base à différentes méthodes pour décider de la priorisation des actions ou des actifs. La seconde, du concept global du RIDM, qui ne se limite pas à l'appréciation numérique du risque (cas de l'approche précédente), mais analyse plusieurs composantes qualitatives et quantitatives dont le risque fait partie et leur interaction, pour aboutir à une décision par délibération (Komljenovic et al., 2016; Lonchampt et al., 2019). Cette décision, certes complexe, mais informée, devient un atout majeur pour ces différentes approches dans le contexte de l'I4.0 qui privilégie des méthodes basées sur les données pour suppléer les limites ou lacunes existantes (Komljenovic et al., 2016; Seow et al., 2016; Vermeer et al., 2015).

4.3.2 - Impact de l'I4.0 dans le secteur de l'électricité

Dans le secteur de l'électricité, le concept de l'industrie intelligente vise la transformation du réseau, selon le concept de réseau électrique intelligent (smart grid [SG]), qui doit s'appuyer sur un système structuré de GDA élaboré selon les spécificités du système électrique complexe à surveiller, optimiser et contrôler, conduisant ainsi le service public de l'électricité à un service intelligent (Liboni et al., 2018). Ce réseau génère une grande quantité de données (Seow et al., 2016) grâce à l'IoT (capteurs, infrastructure de mesurage avancée [IMA] - Advanced Metering Infrastructure [AMI]) et aux compteurs intelligents (smart meters [SM]), et permet de tracer les performances, d'anticiper des défaillances, des dégradations, des non-conformités ou inéquations, des surcharges des actifs (transmission, distribution) en temps réel, de développer des modèles de maintenance prédictive à l'aide de l'IA et de la simulation (Amelete et al., 2021; Biard & Nour, 2021; Liboni et al., 2018; Malcón et al., 2015). Le résultat est une réduction des interruptions et des coûts de maintenance, la surveillance (sur l'ensemble du cycle de vie des actifs physiques complexes) et les remplacements planifiés, la planification optimale de la production par les énergies renouvelables et la réduction de longs investissements pour les filières conventionnelles, l'analyse des scénarios de risques ou de complexité par la simulation dans le cas de la décision pour l'amélioration du cycle de vie (Biard & Nour, 2021; Liboni et al., 2018; Mattioli et al., 2020). L'étude de cas réalisée par Amelete et al.

(2021) permet de comparer la maintenance sans l'I4.0, et celle avec l'I4.0 utilisant l'IMA couplée au développement d'algorithmes de surveillance de la tension et de la consommation client pour le réseau aérien basse tension d'Hydro-Québec Distribution d'électricité. Ce réseau constitue un système réparable. Une simulation à événements discrets effectuée avec l'I4.0 montre une réduction en moyenne de 7% du nombre de pannes et du nombre de consommateurs interrompus, et une réduction en moyenne de 5% des coûts par année, confirmant l'indispensable connexion entre la GDA et l'I4.0 pour l'amélioration de la gestion du cycle de vie des actifs physiques complexes et la profitabilité.

4.4 - Apprentissage

L'apprentissage est un concept souvent perçu, par nature, comme un processus axé uniquement sur les individus, concentrant ou partageant les connaissances sous plusieurs formes, dans le but de valoriser les ressources humaines contribuant à la compétitivité (Lim et al., 2016). Mais ce concept intéresse davantage les organisations ouvertes à leur environnement, modifiant ou transformant leur forme de gestion, en les mettant en relation avec les changements intervenant dans cet environnement et leurs impacts (Pellerin et al., 2019, pp. 14 - 16, 22, 24). Ces changements peuvent être incertains, partiellement perçus ou non par les individus dans leurs analyses ou prédictions, en termes de rationalité, connaissances, méthodes ou risques, et prise de décision (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016).

En considérant la théorie des systèmes, les actifs physiques et les organisations (considérés comme des systèmes, sous-systèmes, suprasystèmes ou métasystèmes (Bale et al., 2015; Benade, 2015; Bosisio et al., 2019; Katina et al., 2021; Komljenovic et al., 2016), selon les échelles ou niveaux d'analyse dans la littérature), évoluent dans un environnement dynamique. Cet environnement comporte une multitude de changements (perturbations, conditions opérationnelles, vieillissement, performances, adoption des nouvelles technologies, politiques, marchés, innovation, climat, etc.) pouvant se combiner

et produire divers effets, rendant la GDA complexe (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016; Liboni et al., 2018; Shahid et al., 2016).

Selon Ouertani et al. (2008), la complexité se conçoit de manière multidimensionnelle et multidisciplinaire : complexité physique des actifs (nombreuses composantes et leur connectivité élevée), complexité de la gestion de l'information (capture, stockage, récupération, utilisation ou analyse), de la maintenance (responsabilité liée à la fourniture des services), de la prise de décision (criticité en rapport avec diverses contraintes). Cette conception de la complexité s'adresse ici à quelques-uns des éléments du contexte intérieur des systèmes de GDA. Toutefois une relation doit être établie entre cette conception au sein d'une organisation et les interactions (échanges ou rétroaction), en termes d'ouverture, de cette organisation avec son environnement. Ces interactions vont conduire à plusieurs propriétés relevées par la science de la complexité, et permettant ainsi de caractériser les systèmes complexes.

Dans le cas du secteur de l'énergie et de l'électricité en particulier, les comportements des divers agents ou acteurs, et les interactions (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018) avec d'autres agents, des objets ou l'environnement opérationnel de ces systèmes, à travers des réseaux physiques et sociaux, s'ajoutent à certains changements, donnant lieu aux principales caractéristiques des SACs (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2015; Komljenovic et al., 2016).

Les changements évoqués précédemment et la complexité, qui se renforcent dans l'environnement à peine prédictible des organisations, leur révèlent souvent les limites des méthodes traditionnelles, du raisonnement humain ou des préférences des acteurs dans la prise de décision (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016), perturbent leurs modèles et imposent de les revoir ou leurs hypothèses, et par conséquent leurs connaissances (Bale et al., 2015; Biard & Nour, 2021). Affectant leur(s) contexte(s) et particulièrement leurs économies, cette situation leur exige des capacités d'adaptation et de réaction pour leur survie et leur compétitivité, en misant sur les ressources humaines (Lim et al., 2016), la compréhension des SACs, des incertitudes et des risques associés selon une approche

alternative (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016). Selon l'AMC (2014), « *une organisation qui recherche activement des changements dans l'environnement ou les connaissances du domaine, et s'adapte pour améliorer ses produits ou services est une organisation apprenante.* » Cette affirmation fait allusion de manière proactive à la fois à une démarche de recherche (par un accent sur la gestion de ces changements et des connaissances), et à un comportement (par l'adaptation ou la transformation), qui visent un résultat (amélioration). Cette organisation conçoit donc son apprentissage comme un processus à la fois cognitif et comportemental, qui affecte son contexte, dans le sens de favoriser sa capacité de réaction et devenir ainsi un facteur d'avantage concurrentiel (Lim et al., 2016). Diverses situations permettent la mise en œuvre de l'apprentissage :

- ✓ interactions entre agents, par l'échange d'informations, le travail collaboratif (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018), interaction entre processus naturels et artificiels (Vom Brocke et al., 2021);
- ✓ interaction collaborative entre cobot (robot collaboratif) et opérateur pour l'apprentissage dans les processus ou l'exécution des tâches de maintenance, interaction humain-machine par la réalité augmentée pour la guidance dans le diagnostic, l'inspection, et la formation accélérée dans l'apprentissage de nouvelles tâches (Silvestri et al., 2020);
- ✓ collaboration active humaine - machine ou humain - SCP de production caractérisée par des interactions, l'échange des informations et des connaissances, et l'apprentissage réciproque dans les processus de résolution de problème; cette collaboration supporte la construction et l'implémentation de modèles informatiques par l'apprentissage provenant de la rétroaction (Ansari et al., 2018);
- ✓ apprentissage rapide des procédures de production ou de maintenance à l'aide de dessins 3D (Silvestri et al., 2020), apprentissage pour les opérateurs dans la structuration des tâches d'assemblage de produits (Ansari et al., 2018);
- ✓ apprentissage dans le cas de résolution de problème face à la complexité, avec le droit à l'erreur (Pellerin et al., 2019, pp. 21, 23 - 24), expérimentation et apprentissage entre humains lors d'interactions dans l'espace social (Ansari et al., 2018);

- ✓ délibération après analyses quantitatives et qualitatives dans la mise en œuvre du processus de décision (Katina et al., 2021; Komljenovic et al., 2016);
- ✓ expérience ou leçons du passé en termes de résultats, mesure et analyse des performances, audits, incidents ou accidents, etc. (AMC, 2014; Baxter & Pandey, 2016; Komljenovic et al., 2016; Liboni et al., 2018; Seow et al., 2016);
- ✓ scénarios sur la réglementation (Liboni et al., 2018; Lima & Costa, 2019);
- ✓ incitation aux apprentissages informels et collaboratifs, à l'auto-apprentissage, afin de renforcer l'agilité de l'organisation (Pellerin et al., 2019, pp. 8, 39 - 44);
- ✓ recours de plus en plus à l'apprentissage automatique (ML) et à l'IA (Liboni et al., 2018; Mattioli et al., 2020; Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019; Seow et al., 2016) qui exploitent des masses de données et les analytiques (BDA), améliorent des modèles informatiques (Ansari et al., 2018) dans le contexte de l'I4.0;
- ✓ passage ou transformation de l'organisation vers un modèle d'organisation apprenante (AMC, 2014; Antalová et al., 2022; Pellerin et al., 2019, pp. 23 - 24).

L'apprentissage organisationnel peut permettre de comparer les résultats attendus, et ceux obtenus, parfois entachés d'erreurs et conduisant à des modifications sur le plan organisationnel, puis à un apprentissage et une adaptation des connaissances aux niveaux individuel et organisationnel (Katina et al., 2021). Cependant, cet apprentissage doit favoriser les processus de l'organisation et leur implémentation, permettre une adaptation à un nouvel environnement, être accompagné d'un changement de mentalité, d'une approche innovante de résolution de problème et de l'application de nouvelles méthodes de travail avec les personnes, et améliorer les capacités de l'organisation. Le but ultime est de faciliter l'émergence d'une organisation apprenante pour constituer un avantage concurrentiel (Antalová et al., 2022; Pellerin et al., 2019).

Le Tableau 4-5 illustre quelques aspects liés à l'apprentissage dans le secteur de l'électricité. Les expériences ou leçons du passé semblent constituer la plus grande part de l'apprentissage, notamment celles ayant conduit à l'émergence du concept de GDA considérant l'approche de cycle de vie entière des actifs physiques dans les années 1980

(IAM, 2015; Seow et al., 2016). Néanmoins, les données ou informations, les connaissances, l'expertise, ou même les expériences ou leçons du passé avec certaines méthodes, qui sont utiles et exploitables dans les organisations modernes et parfois

Tableau 4-5 : Aspects liés à l'apprentissage dans le secteur de l'électricité

Auteur(s) et année	Aspects liés à l'apprentissage	Buts visés
Malcón et al. (2015)	Capacité d'apprentissage	Concepts de base de la gestion (transmission électrique) : organisation intelligente, simulation de la complexité
Vermeer et al. (2015)	Cycle de vie et condition d'un actif physique	Prise de décision en complexité
Baxter et Pandey (2016)	- Apprentissage continu en fonction des résultats - Incidents et organisation apprenante	- Processus de gouvernance des actifs - Évaluation des facteurs principaux d'entreprise
Komljenovic et al. (2016)	Processus d'amélioration continue (rétroaction ou rétroaction : audits internes et externes, expérience opérationnelle, leçons d'accidents nucléaires) et organisation apprenante	Amélioration de la résilience et de la robustesse, adaptabilité et coévolution des entreprises (SACs) dans un contexte interne et externe en constante évolution, et durabilité
Seow et al. (2016)	- Leçons similaires d'incidents d'environnements très différents et convergence des conclusions - Approche basée sur ML/IA	- Approche d'optimisation de la valeur du cycle de vie des actifs - SGDA centré sur la fiabilité
Shen et al. (2016)	Système de gestion de cycle de vie par une approche de raisonnement basé sur des cas (méthode de stockage d'instances, processus d'accumulation d'expérience)	Réduction de la difficulté d'acquisition des connaissances, instances servant de diagnostic de référence
Rinaldi et al. (2017)	Données d'expériences ou de substitution (pour des expériences limitées)	Adaptabilité du modèle à différentes technologies du secteur électrique pour ajout de la valeur
Wardani et Naswil (2017)	Expériences dans l'amélioration du cycle de vie des actifs par la GDA	Alignement des stratégies de cycle de vie avec les objectifs
Alvarez et al. (2019)	Expériences (par la pondération et la condition des actifs)	Adaptation des cadres aux processus et objectifs de gestion de l'organisation et succès des plans de GDA, flexibilité et sécurité
Bosisio et al. (2019)	Changements des paramètres et actions (ou activités effectuées sur les actifs) regroupés en dimensions, et complexité des réseaux	Standardisation, stratégie de GDA (fiabilité de service), interopérabilité et réutilisation de l'information et des connaissances (cycle de vie et décision appropriée)
Lima et Costa (2019)	Intégration des normes (ISO 55001, ISO 31000) et vues d'experts (connaissances et expériences), conçue avec 7 actions clés pour la GDA	Flexibilité d'adaptation à la portée des exigences réglementaires pour l'organisation en situation complexe, multicritère, d'évolution et de priorisation
Lonchampt et al. (2019)	Cadre générique du contexte technique et économique des actifs	Adaptation à certaines spécificités (complexité, contexte, charge, etc.) des types de production pour les investissements, la régulation et la disponibilité
Mohamed Yousuf et Abdulhalem (2019)	Calculs basés sur ML/IA	Anticipation et reconnaissance des sites et actifs à risque (prévention), évolution de la maintenance (réactive, à prédictive efficace, basée sur les risques)

hybrides, s'avèrent insuffisantes ou limitées dans le contexte actuel (environnement complexe, paradigmes de l'I4.0) et les changements associés difficilement prédictibles de manière exacte (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Jemai et al., 2023; Katina et al., 2021; Komljenovic et al., 2016; Seow et al., 2016). Ce contexte adresse de nouvelles problématiques face aux besoins nouveaux des communautés, notamment pour le secteur électrique (nouveaux services, transformation non limitée au numérique, limites des ressources, nouveaux rôles et standard de vie élevé), constitué de multiples agents et objets connectés fonctionnant en réseaux et d'importantes interactions caractérisant les SACs (Bale et al., 2015; Liboni et al., 2018). Bien que la complexité soit omniprésente, plus généralement l'acquisition des connaissances et l'adaptabilité sont recherchées. La mention de la capacité d'apprentissage ou de l'organisation apprenante vise une GDA globale, la gouvernance des actifs physiques, ou l'amélioration continue, à condition d'intégrer l'intelligence, la connectivité et l'humain (étant au centre, selon l'I5.0) dans les processus, pour la simulation de la complexité dans les organisations (Baxter & Pandey, 2016; Komljenovic et al., 2016; Malcón et al., 2015). Un seul article mentionne les propriétés des SACs (Komljenovic et al., 2016), et le principe de l'amélioration continue d'une organisation apprenante avec ses caractéristiques (robustesse, résilience, adaptabilité et durabilité). Le modèle proposé dans le processus de décision exploite des données et informations pour effectuer des analyses incluant le risque, afin d'aboutir à une délibération (Katina et al., 2021; Komljenovic et al., 2016). Ce secteur permet de recueillir d'énormes quantités de données qui sont exploitées dans les analytiques, l'apprentissage automatique et l'IA, à des fins d'anticipation et de prévention des risques (sites, actifs physiques, maintenance), ou de fiabilité (Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019; Seow et al., 2016). De manière générale, les caractéristiques des SACs ne sont pas toujours mises en évidence avec l'apprentissage pour le secteur électrique, dans le sens d'expliquer comment son potentiel permet, en tenant compte de la complexité, d'atteindre les objectifs visés pour les organisations considérées comme SACs. L'apprentissage grâce à l'interaction de l'humain avec la réalité augmentée ou l'apprentissage réciproque dans l'interaction collaborative, notamment pour la maintenance des systèmes (actifs

physiques) réparables (Ansari et al., 2018; Silvestri et al., 2020) sont des exemples pouvant inspirer un apprentissage, à l'échelle de la transformation des organisations. Cet apprentissage peut davantage bénéficier du support des nouvelles technologies, notamment celles qui favorisent les interactions, mais nécessite principalement des approches nouvelles qui prennent en compte la complexité que doit adresser la GDA, ainsi que l'inclusion de l'humain dans tous les processus.

CHAPITRE 5 - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Généralement les modèles ou analyses en GDA se préoccupent de savoir quel est le noyau d'activités. D'autres privilégient certaines disciplines : fiabilité, risque, maintenance, ou certains critères de décision : durabilité, performance ou efficience, etc. Simplement dit : à quoi peut servir la conceptualisation ? Ce cadre de recherche se focalise sur les éléments importants de la GDA, tout en privilégiant son caractère évolutif en accord avec l'environnement dynamique des organisations. Un concept notable de cet environnement est l'économie circulaire qui touche à un aspect structurant qu'est le cycle de vie des actifs physiques.

Une des préoccupations essentielles porte sur l'autonomisation de la GDA décrite par un système, soit intégré (ISO, 2024a), soit complémentaire à d'autres systèmes, contribuant à la stratégie (AMC, 2014; El-Akruti & Dwight, 2013; Fulconis et al., 2014). Pour les organisations contemporaines, la complexité de l'environnement opérationnel et des affaires (Komljenovic et al., 2016) introduit de facto une complexité au niveau de la modélisation des systèmes (réels ou fictifs), et par conséquent celle de la prise de décision et de l'opérationnalisation (Bara et al., 2021). Un éclairage par les concepts ou les construits pertinents impliquant les SACs telles que les organisations en GDA (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016) doit aider dans cette préoccupation, et à appréhender le contexte dans un cadre à valeur collaborative générée (Derrouiche & Neubert, 2013). Toutefois, la GDA, en tant que discipline émergente, dispose d'un concept explicite pouvant guider dans son implémentation, s'étant développée comme un domaine distinct de pratique et de science (IAM, 2015; Wijnia & de Croon, 2015), mais différent de toute approche partielle.

5.1 - Modèle mental ou point de départ de la conceptualisation en GDA

L'intégration est plutôt en faveur de la GDA compte tenu de son concept d'origine (IAM, 2015; Seow et al., 2016). La GDA dispose alors, en tant que discipline transversale, d'un contenu propre à un modèle mental, auquel se greffent d'autres disciplines, modèles, concepts ou théories (Benade, 2015) dont la fusion n'est pas la limite de la GDA. La

diversité des actifs physiques, leur complexité et leur gouvernance, leurs secteurs d'utilisation, leur contexte opérationnel changeant, l'écosystème, les parties prenantes de leur gestion, la transformation numérique et ses exigences, etc. sont des aspects qui peuvent renforcer son étendue, ses pratiques, ses particularités ou sa personnalisation (Katina et al., 2021), tout en permettant la visibilité de son contenu propre (IAM, 2015; Lemerande, 2018; Wijnia & de Croon, 2015).

De plus, selon l'IAM (2024), les réalisations à terme et les impacts générés sur le long terme par une organisation constituent le point de départ pour la conceptualisation en GDA, pour enchaîner avec la structuration de l'organisation. Cet aspect est en relation avec la définition de la valeur selon l'ISO (2024a).

5.2 - Intégration Personnes, Processus, et Technologie

Le concept fondamental de la GDA fait allusion à trois composantes essentielles. Les équipes multidisciplinaires (les individus et leurs interactions, les organisations, leurs PP et leurs valeurs, intérêts parfois conflictuels, influences, perceptions de la valeur, pouvoir ou autorité, etc.) et les actifs physiques et les TIC (la technologie), sont les deux premières composantes de ce concept qui rejoint à la fois la théorie sociotechnique qui prône leur synergie dans leur contexte, et la pensée systémique (Kaminski, 2022; Trist, 1981). Les interactions, devenues importantes, ainsi que les données et informations, les changements, les incertitudes et risques concernant les organisations contemporaines, justifient l'extension du concept à la science de la complexité (Bale et al., 2015; Jemai et al., 2023; Katina et al., 2021; Komljenovic et al., 2016; Liboni et al., 2018). La troisième composante concerne les processus perceptibles de l'approche de cycle de vie des actifs physiques et de la réalisation de la valeur. Cependant, les processus ne sont pas limités à la présence des technologies et à l'émergence de l'I 4.0 et l'I 5.0, focalisant l'attention de la recherche, contrairement aux objets ou systèmes stables (Vom Brocke et al., 2021). La SdP et la science de la complexité présentent toutes deux un caractère interdisciplinaire qui donne une place importante à l'apprentissage (Bale et al., 2015; Katina et al., 2021; Vom Brocke et al., 2021). Les **personnes** (PP en GDA (Bale et al., 2015; Komljenovic et

al., 2016)), les **processus** (cognitifs, opérationnels, intentionnels ou comportementaux mis en œuvre par l’humain, ou naturels, et leurs influences mutuelles (BSI, 2008a; IAM, 2015; Vom Brocke et al., 2021)), et la **technologie** (outils analytiques, technologies opérationnelles et de l’information intelligentes, connectées et intégrées en accord avec la révolution sociotechnique de l’I4.0 et de l’I5.0 (Xu et al., 2021)) constituent donc les trois composantes fondamentales. Leur **intégration** devient ainsi une priorité pour garantir la structuration d’une organisation, leur combinaison conduisant à un système d’information de GDA efficace, à condition de maintenir un **équilibre** et une bonne **relation** entre elles, notamment en termes de transformation numérique de l’organisation et de stratégie pour la technologie (Suakanto et al., 2021). Un aspect de la recherche de cet équilibre est perceptible par la coexistence de l’I4.0 dont l’accent est l’innovation technologique à laquelle l’humain doit s’adapter, et de l’I 5.0 dont l’accent est la valeur pour toutes les PP, rappelant que l’humain est un investissement et non un coût, et que la technologie doit s’adapter à l’humain (Xu et al., 2021). Par la coexistence de ces initiatives, avec l’introduction et la maîtrise des nouvelles technologies numériques, la participation aux projets d’innovation technologique, d’implémentation et de réalisation sur son poste de travail, et la montée en compétences par l’humain en tant que client et acteur ou utilisateur sont fondamentales (Pellerin et al., 2019, pp. 5, 6, 13, 15 et 131). Un **observatoire** est essentiel pour garantir l’équilibre et la relation entre les trois composantes dans la gestion des changements en adéquation avec les transformations appropriées et dans la transparence. L’apport de l’I5.0 dans la prise en compte de l’adaptation des nouvelles technologies aux besoins des personnes (Xu et al., 2021) constitue un intérêt pour cet observatoire. Les changements intervenant dans l’environnement opérationnel et des affaires renforcent la complexité des organisations, et peuvent conduire à une **transformation** globale, plus large (touchant les trois composantes de façon équilibrée) leur offrant plus de **capacités**, notamment de **surveillance**, puis d'**apprentissage** de ces changements pour fournir une **réponse** (résolution ou **adaptation**) afin de prospérer (Kettinger and Grover, 1995, cité dans Lim et al., 2016). Cet observatoire et cette capacité de surveillance sont des atouts dans la visibilité (pas nécessairement un contrôle sur

l'environnement à cause de la complexité) pour l'organisation.

5.3 - Visibilité et cohérence des éléments du contexte de l'organisation en GDA

En accord avec les atouts précédents, l'aspect du contexte de l'organisation doit favoriser une bonne **visibilité** des éléments constitutifs du contexte de l'organisation (GFMAM, 2014; Peterson, 2006). De plus, une approche cycle de vie partielle des actifs physiques ne traduit pas le caractère holistique, puis stratégique de la GDA (Mattioli et al., 2020; Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019). Possiblement, toujours par le biais de ces atouts, la notion de cycle de vie qui couvre autant les actifs physiques, que les produits ou services fournis par ces actifs (par exemple le service de l'électricité), peut être étendue à tous les éléments essentiels de l'organisation ou à celle-ci, pour prendre en compte l'évolution des modèles conceptuels. Par conséquent la conceptualisation en GDA, dans son aspect dynamique (environnement VICA), doit être enrichie des possibilités (plateforme IoT, connectivité, etc.) offertes par l'I4.0 (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Mattioli et al., 2020) dont le caractère perturbateur est perceptible, et nécessite une **cohérence** des regroupements des éléments du contexte (en accord avec les meilleures pratiques et les standards) tout en évitant des redondances. L'environnement des organisations est complexe et affecté d'incertitudes, qui caractérisent les risques étroitement liés à la satisfaction des PP ; leur gestion doit être rattachée à l'entité du plus haut niveau (Komljenovic et al., 2016; Leitch & Ellsworth, 2016) qui sert d'interface à une organisation avec son environnement pour intégrer les facteurs influents externes et internes. L'approche de GDA intelligente, basée sur les données, dont l'architecture est proposée par El Bounjimi et Abdul-Nour (2021) et conçue afin de satisfaire les attentes des PP, en considérant les risques nouveaux, repose donc sur :

- ✓ un système de GDA structuré autour des trois composantes personnes, processus et technologie, qui indique les interactions possibles, répondant au besoin crucial d'information sur le plan stratégique pour la prise de décision (El Bounjimi & Abdul-Nour, 2021; Liboni et al., 2018);

- ✓ l'humain disposant de nouvelles capacités introduites par l'I4.0 (Ansari et al., 2018; Liboni et al., 2018; Silvestri et al., 2020) dans les différents niveaux d'intégration horizontale ou verticale de la chaîne de valeur, fonctions (propriétaire, gestionnaire, fournisseur d'actifs physiques) ou processus de l'organisation;
- ✓ de nouvelles méthodes ou façons de travailler incluant l'humain, favorisant les capacités d'apprentissage ou d'auto-apprentissage (Antalová et al., 2022; Bale et al., 2015; Pellerin et al., 2019; Xu et al., 2021).

Dans le cas du secteur de l'électricité, la structuration passe par des modèles caractérisés par une approche globale basée sur la valeur, et sur le concept du réseau électrique intelligent qui favorise un service intelligent de l'électricité (Liboni et al., 2018). Ce service est allié au cycle de vie d'actifs physiques connectés et priorise leur maintenance optimale vis-à-vis du risque (Khuntia et al., 2016; Lundgren et al., 2018; Seow et al., 2016).

Le contexte actuel met une emphase sur le changement du modèle linéaire (dégénératif) de l'approche de cycle de vie pour un autre modèle (reconstituant et régénératif) introduit par l'économie circulaire pouvant se définir comme un changement économique et sociétal vers la durabilité et la régénération (IAM, 2022). La GDA peut s'appuyer sur un cycle de vie d'actifs physiques continu en boucle fermée et sur des modèles d'affaires visant l'optimisation des ressources pour réaliser la valeur en mettant en place des outils et des processus correspondants afin d'appliquer les principes de l'économie circulaire (voir le nouveau modèle conceptuel de l'IAM (2022)). Dans cette perspective, les interventions en maintenance consistent en l'extension de la durée de vie des actifs physiques actuels, le développement de pratiques alternatives rendant superflu le besoin de nouveaux actifs (fabrication ou rétention de pièces ayant une longue durée de vie sans maintenance, de pièces réutilisables ou réparables, surveillance de la condition des actifs physiques grâce à l'IoT, acquisition d'un modèle d'actif en tant que service, etc.)(IAM, 2022). La fabrication intelligente contribue également à l'application des principes de l'économie circulaire dans le domaine du recyclage, de la réutilisation, et de la

refabrication (Liboni et al., 2018). Ces principes sont donc en faveur des systèmes réparables et les politiques ou processus correspondants de réparation ou de remplacement en maintenance. La surveillance des systèmes réparables avec les technologies de l'I4.0 peut davantage jouer un rôle important dans ce contexte d'économie circulaire en déterminant l'âge ou la durée de fonctionnement réel des actifs physiques ou leurs composantes réparables ciblées.

5.4 - Apport des acteurs : validation des modèles conceptuels et réduction de l'écart entre la recherche et la pratique

L'apport des acteurs reste une préoccupation majeure considérant la nécessité de la **validation** des modèles conceptuels. Cette validation permet de concrétiser la démarche visant à opérationnaliser les modèles dans un cadre approprié. Un modèle non vérifié conserve le statut d'un **modèle hypothétique** (El-Akruti et al., 2018; Roda & Macchi, 2018). La GDA est une approche transversale qui doit éliminer les silos. Aussi la vérification des modèles conceptuels nécessite de faire appel à des équipes pluridisciplinaires, constituée de toutes les catégories d'acteurs afin de favoriser un **avantage collaboratif**, par le partenariat, la mutualisation des compétences, et le bénéfice d'une expertise transversale qu'apportent l'expérience, les études de cas, ou la tutelle dans la conduite de projets pilotes. La familiarité des acteurs avec le domaine ou le secteur concerné est un atout majeur pour la vérification (Brown et al., 2014; El-Akruti et al., 2018; Komljenovic et al., 2016; Roda & Macchi, 2018). L'aspect **financement**, mentionné dans plusieurs articles, rapports ou guides exploités dans cette recherche, par l'implication d'agences ou d'organismes pourvoyeurs de fonds dans la démarche de la conceptualisation à l'opérationnalisation, est également essentiel. Le but ultime de tout cet apport (démarche, financement) est la **réduction de l'écart entre recherche, expertise et pratique**, ou des barrières (Liboni et al., 2018; Parlidak, 2019; Zhang et al., 2020), tout en **minimisant les risques** liés aux données et informations échangées dans un environnement connecté et en préservant les intérêts des différents acteurs en accord avec le partenariat ou leurs relations (Derrouiche & Neubert, 2013). Les acteurs concernés

peuvent être intégrés comme PP dans le contexte des organisations ou pour des aspects spécifiques, notamment pour accroître leur périmètre en GDA.

5.5 - Spécificités du secteur de l'électricité : entre équilibre et objectif global en GDA

Le secteur électrique est caractérisé par un nombre important d'actifs physiques, diversifiés et complexes, répartis sur de grandes échelles (de temps et d'espace) et en réseaux interconnectés, de manière centralisée ou distribuée (cas de la production), pour assurer le service de l'électricité. Ce service critique comporte plusieurs **enjeux** : demande fluctuante pour les besoins des sociétés modernes, difficulté de stockage de l'énergie, globalisation et marchés volatils, environnement (limites des ressources fossiles et leur impact, végétation, choix de sites), climat (intermittence des ressources), sécurité des populations (contraintes), vieillissement des actifs physiques, barrières à la modernisation. L'environnement opérationnel et des affaires de ce secteur sont constitués de **nombreuses PP en interactions**, avec des intérêts divers et parfois conflictuels considérant les enjeux précédents (Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016; Liboni et al., 2018), et l'introduction des nouvelles technologies de l'I 4.0 facilitatrices de la connectivité et de l'intelligence renforcent sa **complexité** (Silvestri et al., 2020). Si ce secteur a des caractéristiques communes avec d'autres secteurs de distribution dans le but d'élaborer des **métamodèles** avec une approche uniforme pour toutes les infrastructures en **GDA multi-utilités** et de favoriser des économies d'échelle (Bosisio et al., 2019), la complexité est accrue et représente un coût (Komljenovic et al., 2016). La production (notamment centralisée) et le transport ne sont pas pris en compte dans le métamodèle précédent, la **difficulté du stockage de l'énergie produite en grande quantité** à l'heure actuelle est préoccupante, la **nécessité d'un équilibre entre production et consommation en temps réel** est indispensable. La mise en compétition des diverses filières de production est une pratique obligatoire pour obtenir un coût marginal de l'électricité convenable pour toutes les PP en accord avec la qualité de service. Le fait que la production, le transport et la distribution fonctionnent en silos peut ne pas faciliter l'adéquation de la raison d'être (ou objet) de l'organisation avec son contexte (voir objet & contexte du modèle (IAM, 2024)),

et satisfaire l'**objectif global** de la chaîne de valeur du service de l'électricité (Biard & Nour, 2021). De plus, ce secteur permet de plus en plus l'ouverture à l'énergie dite distribuée et aux modes nouveaux de consommations par les recharges de véhicules électriques, les habitats connectés, etc. (Bosisio et al., 2019), mais également au transport qui sollicitent les réseaux électriques.

5.6 - Apprentissage : anticipation et intervention dans le cours du changement

L'apprentissage prend de plus en plus une place prépondérante dans les organisations, notamment dans la recherche de nouvelles façons de faire ou d'organiser le travail. Ceci favorise l'inclusion des personnels dans la responsabilisation, l'autonomisation ou la prise de décision, ou en termes de capacités d'apprentissage disponibles au sein du cadre intégré de personnes, de processus et de la technologie de la gestion pour anticiper les changements, dans un environnement VICA (Antalová et al., 2022; Bale et al., 2015; Komljenovic et al., 2016; Pellerin et al., 2019). Le but ultime est la résolution de problèmes et la recherche de la performance des organisations liée à leur survie (AMC, 2014; Ansari et al., 2018; Antalová et al., 2022; Lim et al., 2016), mais qui nécessite un **changement de mentalité** (mindset), non pas seulement face au numérique de plus en plus présent, mais global au niveau de la direction (**leadership**), la gestion (**management**), et l'exécution (**excellence opérationnelle, prestation de service ou livraison**) dans les organisations. Ces trois fonctions (et leurs processus ou activités) qui sont ainsi visées, rappellent le modèle conceptuel de Peterson (2006), les modèles servant de référence dans le secteur électrique (Brown & Humphrey, 2005; CIGRÉ, 2010; EPRI, 2020) ou celles qui sont le plus souvent mises en évidence dans d'autres modèles conceptuels ou en termes d'exigences (AAMCoG, 2012; AMC, 2014; IAM, 2024; IPWEA, 2020; ISO, 2024b). Plusieurs modèles limitent l'apprentissage aux leçons ou expériences du passé, d'autres aux meilleures pratiques, ou à l'apprentissage en continu en fonction des résultats, tandis que la tendance actuelle est à l'utilisation de l'apprentissage machine (ML) et de l'IA grâce à l'accès à d'énormes quantités de données (Malcón et al., 2015; Mattioli et al., 2020; Mohamed Yousuf & Abdulhalem, 2019; Seow et al., 2016). L'interaction de l'humain avec les robots collaboratifs favorise

l'apprentissage réciproque (Ansari et al., 2018; Silvestri et al., 2020), et avec la réalité augmentée est également prometteuse, car facilitant l'apprentissage de nouvelles situations (guidance dans le diagnostic, l'inspection et la formation accélérée dans l'apprentissage de nouvelles tâches), affectant les **aspects cognitif et comportemental**. La complexité des actifs physiques capture plusieurs aspects de la GDA, mais soulève également des problématiques pour l'humain en termes de gestion de la SST (Jemai et al., 2023). L'apprentissage peut être mis en œuvre, pour explorer les processus (Vom Brocke et al., 2021) faisant intervenir l'humain, afin d'investiguer sur l'adaptabilité des nouvelles technologies comme le préconise l'I5.0 (Xu et al., 2021) ou même de nouvelles capacités à l'humain. De même, cette mise en œuvre peut permettre d'investiguer sur les erreurs, les incidents ou accidents pour les **anticiper et intervenir** possiblement dès la phase de conception des technologies ou des processus, ou **dans le cours du changement** (Vom Brocke et al., 2021).

De manière synthétique, cette recherche sur les modèles conceptuels regroupe cinq critères favorisant la compréhension sur la problématique de la conceptualisation en GDA, et qui sont des indications pertinentes sur le contexte de la GDA, pour l'adoption (ou l'adaptation) d'un modèle conceptuel par une organisation.

Cette recherche montre que, pour parvenir à un modèle conceptuel vérifié, dont la pertinence et la finalité sont établies, la conceptualisation en GDA doit envisager, dès le départ, les perspectives de l'organisation (opérationnalisation du modèle, sorties et résultats) qui conduisent à associer aux cinq critères précédents, trois conditions. La première concerne les réalisations à terme et leurs impacts, caractérisant la responsabilité globale à assumer par l'organisation dans sa gestion aussi longtemps que ses réalisations ont des effets dans leur environnement. La seconde est celle qui établit l'adéquation de la raison d'être de l'organisation avec son contexte, justifiant sa présence ou son activité de façon globale et pérenne dans un contexte temporel et spatial. La troisième reflète une vision toujours plus large par l'implication de toutes les catégories d'acteurs favorisant une connaissance pratique de la discipline. La révision d'un modèle reflète des

changements dans l'environnement de l'organisation, et qui affectent les aspects structurants de son système de GDA, dans le but de bâtir ou d'ajuster ses capacités, activités, fonctions ou processus. La Figure 5-1 présente une synthèse du cadre de la conceptualisation en GDA, distinguant sa limite avec l'opérationnalisation lui fournissant certaines conditions (ligne verticale). Ce cadre peut être étendu à tout type d'organisation moderne en GDA, en se référant à une revue systématique de littérature appropriée.

Certains secteurs, notamment celui de l'électricité, exploitent les modèles présentés ou analysés et qui peuvent être globalement regroupés en deux grandes catégories.

- ✓ Les modèles basés sur les activités, qui sont génériques, pouvant correspondre à tout type d'organisation (moyennant quelques adaptations ou modifications, ou une transposition selon le contexte), et qui s'inspirent des normes ISO de GDA sans toutefois se limiter à leur conformité par un système de GDA minimal. Ces modèles mettent l'accent sur :
 - la **gouvernance**, manière de structurer les différents systèmes (types d'actifs, combinaison, organisations, etc.) de **façon globale** en GDA à divers niveaux (microscopique, macroscopique, etc.) selon certaines caractéristiques (exemples : pensée systémique, classes d'actifs, théorie sociotechnique, systèmes complexes ou adaptatifs complexes, organisation apprenante, etc.); une vision globale aide dans la modélisation et l'amélioration de la performance.
 - un **leadership** efficace, insistant sur une orientation claire provenant des principes établis et axés sur les résultats, favorisant la collaboration.
 - les possibilités de **renforcement** d'une GDA intégrée et multidisciplinaire, en fonction des besoins du contexte évolutif sous l'impulsion du leadership.
- ✓ Les modèles basés sur les trois fonctions interdépendantes de propriétaire d'actifs, gestionnaire d'actifs, et prestataire de services d'actifs, qui sont dédiés aux infrastructures de service public, soit pour la composante du transport d'électricité, ou pour la composante de la distribution, et favorisent l'accent sur chaque fonction pour des raisons d'efficience des organisations. Les infrastructures sont un type d'actifs

physiques évolutionnaires, dont l'utilisation est régulée. Les modèles sont souvent caractérisés par une **spécialisation** (notamment dans le transport, ou la distribution),

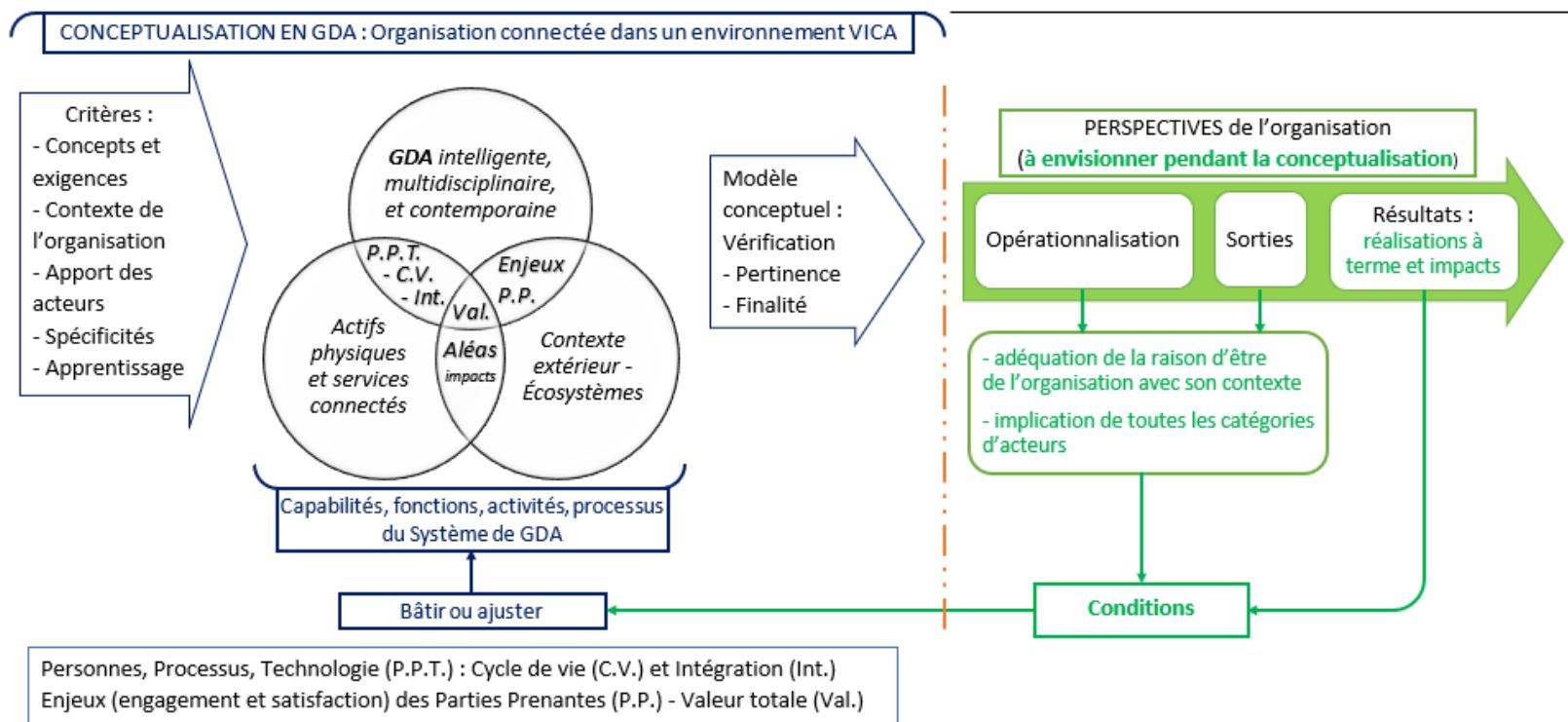


Figure 5-1 : Cadre de la conceptualisation en GDA

et mettent l'**accent sur les risques** à cause :

- de la criticité des infrastructures et du service offert (défaillances visibles, incitatifs, compromis et compensation admis dans la gestion);
- de la nécessité de lourds investissements, pour une gestion sur le long terme;
- de la recherche constante d'un équilibre entre coûts et risques;
- de la croissance des besoins nouveaux liés à ce service;
- de l'accès de toutes les communautés au service et des objectifs de durabilité et de résilience, devenus prioritaires pour les gouvernements.

Une adéquation est nécessaire entre ces trois fonctions et une approche globale du cycle de vie des infrastructures.

CONCLUSION

La conceptualisation, pour une GDA intelligente, multidisciplinaire, et contemporaine ancrée sur son concept fondamental, est une des clés permettant aux organisations (SACs) de surmonter les difficultés rencontrées dans leur environnement impliquant un écosystème numérique, de multiples sources de données et divers types de risques, pouvant être abordé par des modèles conceptuels introduisant de nouvelles méthodes.

Plusieurs modèles principaux et leurs guides ou standards servant de références ont été présentés, ce qui indique une certaine convergence pour l'avancée d'une GDA globale, permettant de réaliser la valeur pour toutes les PP par des modèles conceptuels évolutifs, nécessitant l'intégration (personnes, processus et technologie) associée au concept de cycle de vie (non limité aux actifs physiques). Les enjeux de la conceptualisation ont donc conduit à élaborer des critères pour effectuer l'analyse critique et la comparaison de modèles de divers secteurs. Ces critères, assortis de certaines conditions, permettent d'examiner la pertinence et la finalité de ces modèles, et visent à doter la GDA de nouvelles capacités devant garantir la compétitivité, l'agilité, la durabilité et la résilience.

Les concepts et exigences sont renforcés par l'économie circulaire, les initiatives de l'I4.0 et de l'I5.0, et d'autres théories (TS, complexité, organisation apprenante, SdP, etc.) pour atteindre des objectifs ou résultats. Le contexte de l'organisation (par sa raison d'être en adéquation) favorise la visibilité de son environnement (changements, pluralité des PP et des écosystèmes), facilitant ainsi l'évaluation (réalisations et impacts). L'apport des acteurs (avec l'implication de toutes les catégories), offre un avantage collaboratif par le partenariat et la mutualisation des compétences, ouvrant la voie à la réduction des écarts ou barrières, la validation des modèles conceptuels, une connaissance pratique de la discipline, et l'extension de son périmètre. Le secteur de l'électricité, par ses spécificités, et ses contraintes (climat, perturbations, vieillissement des actifs physiques, environnement, etc.), doit adresser sa criticité, à l'aide des facilitateurs (implication de l'I4.0, surveillance, maintenance prédictive, etc.) propices à l'essor d'un réseau électrique intelligent, pour assurer la qualité et la continuité du service. L'apprentissage vise à

appréhender les changements et les interactions (humain – machine, entre processus, idées et expériences) en s'appuyant sur l'aspect informatif des théories pour la résolution de problèmes, et à impacter l'organisation sur les plans cognitif et comportemental qui affectent son contexte (capacité de réaction, anticipation, avantage concurrentiel).

La contribution de cette recherche va dans le sens de prôner, comme plusieurs acteurs, la structuration de la GDA en tant que discipline, et d'éclairer sur les acquis (concepts, standards, terminologie, potentiel d'initiatives ou de diverses théories, etc.) qui peuvent inspirer la conceptualisation incluse dans une démarche vers l'opérationnalisation.

Les recherches futures suivantes présentent un intérêt pour les modèles conceptuels :

- ✓ La définition, le contexte, les implications de la coexistence de l'I4.0 et de l'I5.0 et des nouvelles technologies, et les risques associés, pour une GDA intelligente constituent une priorité pour l'élaboration des modèles ; l'échange de données entre organisations et PP qui implique un partage des risques nécessite d'être exploré.
- ✓ L'impact de l'I4.0 sur les regroupements des éléments du système de GDA d'une organisation dans un modèle conceptuel nécessite une compatibilité des principes préconisés par l'ISO avec divers critères : complexité, capacités, approche de la qualité (PDCA, Lean, etc.), connectivité ou intelligence, architectures, etc.
- ✓ Une approche complète de cycle de vie d'actifs physiques connectés favorise leur trace en alignement avec les objectifs de l'organisation ; la visibilité des éléments du système de GDA et leurs interactions avec cette approche, et notamment en maintenance, sont à analyser.
- ✓ L'apprentissage peut disposer d'un potentiel important sur lequel la recherche doit se pencher pour aider les organisations à mieux adresser la complexité et la complémentarité dans les interactions en GDA pour la résolution de problèmes en relation les trois composantes personnes, processus et technologie.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- AAMCoG. (2012). *Guide to Integrated Strategic Asset Management, Version 2.0*. Australian Asset Management Collaborative Group (AAMCoG). https://www.academia.edu/1889952/Guide_to_Integrated_Strategic_Asset_Management
- Abdul-Nour, G., Gauthier, F., Diallo, I., Komljenovic, D., Vaillancourt, R., & Côté, A. (2021). Development of a Resilience Management Framework Adapted to Complex Asset Systems: Hydro-Québec Research Chair on Asset Management. In A. Crespo Márquez, D. Komljenovic, & J. Amadi-Echendu (Eds.), *14th WCEAM Proceedings 2019* (pp. 126-136). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_12
- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050-1062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>
- Ahmad, M. A., Baryannis, G., & Hill, R. (2024). Defining Complex Adaptive Systems: An Algorithmic Approach. *Systems*, 12(2), 45. <https://doi.org/10.3390/systems12020045>
- Alkhuraissi, S. H., & Alwahaibi, A. A. (2016). Benefits of implementing a new asset management operating model within buildings and facilities in Saudi Arabia. AM Conference 2016, (pp. 1-5). London: IET. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1436>
- Alvarez, D. L., Rosero, L. S., Rivera, S. R., & Romero, A. A. (2019). A Framework For Asset Management in Electrical Systems, Part I: Conceptual Model. 2019 IEEE Workshop on PEPQA, (pp. 1-6). Manizales, Colombia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEPQA.2019.8851575>
- AMC. (2014). *AMBoK Publication 000: Framework for Asset Management, Second Edition*. Asset Management Council (AMC) Ltd. <https://www.amcouncil.com.au/free-download-framework-for-asset-management-second-edition-pdf/>
- Amelete, S., Vaillancourt, R., Abdul-Nour, G., & Gauthier, F. (2021). Asset Management, Industry 4.0 and Maintenance in Electrical Energy Distribution. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, (pp. 199-208). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85914-5_21
- Ansari, F., Khobreh, M., Seidenberg, U., & Sihn, W. (2018, 2018/08/01/). A problem-solving ontology for human-centered cyber physical production systems. *CIRP Journal of*

Manufacturing Science and Technology, 22, 91-106.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.002>

Antalová, M., Fodranová, I., & Labudová, V. (2022). Learning organization as a tool for high-performance management. *Polish Journal of Management Studies*, 26(1).
<https://doi.org/10.17512/pjms.2022.26.1.02>

Baglee, D., Ihemegbulem, I., & Marttonen-Arola, S. (2016). Identifying organizational requirements for the implementation of ISO 55000 in small to medium sized enterprises (SMEs). Euromaintenance 2016. Athens, Greece: EFNMS.
<http://sure.sunderland.ac.uk/id/eprint/8015>

Bale, C. S. E., Varga, L., & Foxon, T. J. (2015). Energy and complexity: New ways forward. *Applied Energy*, 138, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.057>

Bara, N., Gautier, F., & Giard, V. (2021). Problèmes méthodologiques posés par les systèmes de valorisation dans les modèles économiques de management industriel. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 35(1), 40-56. <https://doi.org/10.53102/2021.35.01.905>

Basu, A. P., & Rigdon, S. E. (2000). *Statistical Methods For The Reliability Of Repairable Systems* (1st ed.). John Wiley and Sons.

Baxter, J. E., & Pandey, A. K. (2016). Implementation of an integrated asset management system. AM Conference 2016, (pp. 1-16). London: IET. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1423>

Benade, S. J. (2015). Merging disciplines: An exploratory study. 2015 PICMET, (pp. 1121-1132). Portland, OR, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PICMET.2015.7273071>

Biard, G., & Nour, G. A. (2021). Industry 4.0 Contribution to Asset Management in the Electrical Industry. *Sustainability*, 13(18), 10369. <https://doi.org/10.3390/su131810369>

Bosisio, A., Giustina, D. D., Fratti, S., Dedè, A., & Gozzi, S. (2019). A Metamodel for Multi-utilities Asset Management. 2019 IEEE Milan PowerTech, (pp. 1-4). Milan, Italy: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810812>

Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg, LU: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 46. <https://doi.org/10.2777/308407>

- Brown, K., Laue, M., Tafur, J., Mahmood, M. N., Scherrer, P., & Keast, R. (2014). An Integrated Approach to Strategic Asset Management. In A. V. Gheorghe, M. Masera, & P. F. Katina (Eds.), *Infranomics* (Vol. 24, pp. 57-74). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02493-6_5
- Brown, R. E., & Humphrey, B. G. (2005, May-June). Asset management for transmission and distribution. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(3), 39-45. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2005.1436499>
- BSI. (2008a). *Publicly Available Specification. PAS 55-1:2008. Asset Management. Part 1: Specification for the optimized management of physical assets.* The British Standards Institution (BSI), UK. <https://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2014/01/pass55-2008.pdf>
- BSI. (2008b). *Publicly Available Specification. PAS 55-2:2008. Asset Management. Part 2: Guidelines for the application of PAS 55-1.* The British Standards Institution (BSI), UK. <https://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2014/01/pass55guide.pdf>
- CIGRÉ. (2010). *Transmission Asset Risk Management, TB422.* Working Group C1.16. Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ). <https://www.e-cigre.org/publications/detail/422-transmission-asset-risk-management.html>
- CIGRÉ. (2014). *IT Strategies for Asset Management of Substations - General Principles, TB576.* Working Group B3.06 TF 05. Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ). <https://www.e-cigre.org/publications/detail/576-it-strategies-for-asset-management-of-substations-general-principles.html>
- Crespo Márquez, A., Macchi, M., & Parlikad, A. K. (2020). Fundamental Concepts and Framework. In A. Crespo Márquez, M. Macchi, & A. K. Parlikad (Eds.), *Value Based and Intelligent Asset Management* (pp. 3-38). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20704-5_1
- Derrouiche, R., & Neubert, G. (2013). Supply Chain Collaborative: revue de littérature des attributs de caractérisation des relations dyadiques. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 32(1), 7-26. <https://doi.org/10.53102/2013.32.01.686>
- DIT. (2025). *Strategic Asset Management Framework. A Guide for Managing South Australian Government Buildings, Version 2.2.* State of South Australian Department for Infrastructure and Transport.

https://www.dit.sa.gov.au/_data/assets/pdf_file/0018/1137150/DOCS_AND_FILES-23186015-v1-Framework - Strategic Asset Management.pdf

El-Akruti, K., & Dwight, R. (2013). A framework for the engineering asset management system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(4), 398-412. <https://doi.org/10.1108/JQME-01-2012-0002>

El-Akruti, K., Kiridena, S., & Dwight, R. (2018). Contextualist-retroductive case study design for strategic asset management research. *Production Planning & Control*, 29(16), 1332-1342. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1535145>

El Bounjimi, M., & Abdul-Nour, G. (2021). Smart Asset Management in Power Industry: A Review of The Key Technologies. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(10), 388-393. <https://doi.org/10.17577/IJERTV10IS100149>

EPRI. (2002). *Risk-Informed Asset Management (RIAM) Development Plan*. EPRI, Palo Alto, CA: 2001.1006268. <https://www.epri.com/research/products/1006268>

EPRI. (2020). *Power Delivery Asset Management Guidelines: 2020 Update*. EPRI, Palo Alto, CA: 2020. 3002018819 <https://www.epri.com/research/products/000000003002018819>

FCM. (2018). *How to develop asset management policy strategy : Set up a consistent approach to asset management in your municipality*. Federation of Canadian Municipalities (FCM). <https://fcm.ca/sites/default/files/documents/resources/guide/how-to-develop-asset-management-policy-strategy-mamp.pdf>

Fulconis, F., Paché, G., & Solle, G. (2014). Évaluer la performance des réseaux inter-organisationnels: le contrôle de gestion au défi du collectif. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 33(4), 45-63. <https://doi.org/10.53102/2014.33.04.792>

Gaha, M., Chabane, B., Komljenovic, D., Côté, A., Hébert, C., Blancke, O., Delavari, A., & Abdul-Nour, G. (2021). Global methodology for electrical utilities maintenance assessment based on risk-informed decision making [Article]. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16), Article 9091. <https://doi.org/10.3390/su13169091>

Gamache, S. (2019). *Stratégies de mise en œuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Canada]. <https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/8821>

Germán, M. O., Molina, J. D., Romero, A. A., Gómez, H. D., & García, E. (2014). Power asset management: Methods and experiences in Colombian power system. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA, 10-13 Sept. 2014), (pp. 1-6). Medellin, Colombia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2014.6955209>

GFMAM. (2014). *The Asset Management Landscape, Second Edition, English Version*. The Global Forum on Maintenance and Asset Management (GFMAM). https://www.gfmam.org/sites/default/files/2019-05/GFMALandscape_SecondEdition_English.pdf

GFMAM. (2024). *The Asset Management Landscape, Third Edition, English Version*. The Global Forum on Maintenance and Asset Management (GFMAM). <https://gfmam.org/publications/asset-management-landscape-v30>

Glasson, J., & Gibbons, P. (2015). Understanding the context of the organisation: Adopting a systems thinking approach to asset management. AM Conference 2015, (pp. 1-27). London, UK: IET. <https://doi.org/10.1049/cp.2015.1721>

Hocking, B., & Sproston, C. (2018). A model-based systems engineering approach to developing an asset management framework for rail organisations. SETE Conference 2018, (pp. 209-220). Melbourne: Engineers Australia. <https://doi.org/10.3316/informit.631240558320762>

IAM. (2015). *Asset Management - an anatomy, Version 3*. The Institute of Asset Management (IAM) Bristol, UK. https://theiam.org/media/1486/iam_anatomy_ver3_web-3.pdf

IAM. (2022). *How Asset Management Can Enable the Circular Economy, Version 1*. The Institute of Asset Management (IAM). <https://theiam.org/media/4103/iam-how-asset-management-can-enable-the-circular-economy.pdf>

IAM. (2024). *Asset Management - an anatomy, Version 4*. The Institute of Asset Management (IAM) Bristol, UK. <https://theiam.org/media/5615/iam-anatomy-version-4-final.pdf>

IPWEA. (2015). *Supplement to the IIMM 2015: Meeting ISO 55001 Requirements*. Institute of Public Works Engineering Australasia (IPWEA). <https://pdfcoffee.com/iimm-iso-supplement-2015-pdf-free.html>

IPWEA. (2020). *Supplement to the IIMM 2020: Meeting ISO 55001 Requirements*. Institute of Public Works Engineering Australasia (IPWEA). <https://www.ipwea.org/resourcesnew/bookshop/iimm-supplement-2020>

Islam, S. (2016, 16-18 Dec. 2016). Digital applications in implementation of smart grid. 2016 International Conference on Accessibility to Digital World (ICADW), (pp. 3-7). Guwahati, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICADW.2016.7942504>

ISO. (2014). *International Standard. ISO 55000. Asset management - Overview, principles and terminology*. The International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/fr/standard/55088.html>

ISO. (2017). *Asset Management - Managing Assets in the context of Asset Management*. The International Organization for Standardization (ISO). <https://committee.iso.org/files/live/sites/tc251/files/guidance/ISO%20TC251%20WG4%20MACAM%20May%202017%20EN2.pdf>

ISO. (2024a). *Norme internationale. ISO 55000. Gestion d'actifs - Vocabulaire, aperçu général et principes*. Organisation internationale de normalisation (the International Organization for Standardization - ISO). <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:55000:ed-2:v1:fr>

ISO. (2024b). *Norme internationale. ISO 55001. Gestion d'actifs - Systèmes de gestion d'actifs - Exigences*. Organisation internationale de normalisation (the International Organization for Standardization - ISO). <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:55001:ed-2:v1:fr>

Jemai, H., Badri, A., & Fredj, N. B. (2023). Towards better understanding of the complex industrial systems: Case of production systems. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 14(3), 383-391. <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00606>

Kaminski, J. (2022). Editorial. Theory applied to informatics: Socio-Technical Theory. *Canadian Journal of Nursing Informatics*, 17(3-4). <https://cjni.net/journal/?p=10442>

Katina, P. F., Pyne, J. C., Keating, C. B., & Komljenovic, D. (2021). Complex system governance as a framework for asset management. *Sustainability*, 13(15), 8502. <https://doi.org/10.3390/su13158502>

Khuntia, S. R., Rueda, J. L., Bouwman, S., & van der Meijden, M. A. M. M. (2016). A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system.

International Transactions on Electrical Energy Systems, 26(10), 2123-2133.
<https://doi.org/10.1002/etep.2193>

Komljenovic, D., & Abdul-Nour, G. (2015). Impact of rare events on the strategy of asset management. 11e Congrès international de génie industriel (CIGI2015). Québec-City, Canada.

http://www.simagi.polymtl.ca/congresgi/cigi2015/Articles/CIGI_2015_submission_69.pdf

Komljenovic, D., Abdul-Nour, G., & Boudreau, J. F. (2019). Decision-Making in Asset Management Under Regulatory Constraints. In J. Mathew, C. W. Lim, L. Ma, D. Sands, M. E. Cholette, & P. Borghesani (Eds.), *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies* (pp. 323-332). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_32

Komljenovic, D., Abdul-Nour, G., & Popovic, N. (2015). An approach for strategic planning and asset management in the mining industry in the context of business and operational complexity. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 6(4), 338-360.
<https://doi.org/10.1504/IJMME.2015.073047>

Komljenovic, D., Gaha, M., Abdul-Nour, G., Langheit, C., & Bourgeois, M. (2016). Risks of extreme and rare events in Asset Management. *Safety Science*, 88, 129-145.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.05.004>

Konstantakos, P. C., Chountalas, P., & Magoutas, A. (2019). The contemporary landscape of asset management systems. *Quality - Access to Success*, 20(169), 10-17.
<https://ssrn.com/abstract=3380765>

Laue, M., Brown, K., Scherrer, P., & Keast, R. (2014). Integrated strategic asset management: Frameworks and dimensions. In A. V. Gheorghe, M. Masera, & P. F. Katina (Eds.), *Infranomics*. (Vol. 24, pp. 75-87). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02493-6_6

Leitch, R. B., & Ellsworth, D. E. (2016). Implementing asset management for the U.S. Army Corps of Engineers civil works. AM Conference 2016, (pp. 1-9). London: IET.
<https://doi.org/10.1049/cp.2016.1404>

Lemerande, T. (2018). Leading the Naval Asset Management Effort with a Framework for Fleet Life Cycle Management. E-proceedings of AMPEAK 2018. Hobart, Tasmania: AMC.
<https://www.researchgate.net/publication/324923632>

- Liboni, L. B., Liboni, L. H. B., & Cezarino, L. O. (2018). Electric utility 4.0: Trends and challenges towards process safety and environmental protection. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.027>
- Lim, B. T. H., Wang, Z., & Oo, B. L. (2016, 2016/10/01). Change management for sustainable competitive advantages: the roles of organisational culture and employees in the Chinese construction firms. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7(3-4), 230-236. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2017.1302842>
- Lima, E. S., & Costa, A. P. C. S. (2019). Improving Asset Management under a regulatory view. *Reliability Engineering & System Safety*, 190, 106523. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106523>
- Lonchampt, J., Aubert, K., Dautrême, E., & Sueur, R. (2019). Engineering Asset Management for Various Power Sources: Common Concepts and Specificities. In J. Matheu, C. Lim, L. Ma, D. Sands, M. Cholette, & P. Borghesani (Eds.), *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies* (pp. 393-403). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_39
- Lundgren, C., Skoogh, A., & Bokrantz, J. (2018). Quantifying the Effects of Maintenance - A Literature Review of Maintenance Models. *Procedia CIRP*, 72, 1305-1310. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.175>
- Mahmood, M. N., Dhakal, S., Wiewiora, A., Brown, K., & Keast, R. (2015). A comparative study on asset management capability maturity models. *International Journal of Strategic Engineering Asset Management*, 2(4), 328-347. <https://doi.org/10.1504/ijseam.2015.075412>
- Malcón, J., Sardi, G., Carnelli, E., & Franco, R. (2015). Smart Management of Transmission Network in UTE. 2015 IEEE PES ISGT LATAM, (pp. 440-444). Montevideo, Uruguay: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2015.7381195>
- Mattioli, J., Perico, P., & Robic, P.-O. (2020). Artificial intelligence based asset management. 2020 IEEE 15th International Conference of SoSE, (pp. 151-156). Budapest, Hungary: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SoSE50414.2020.9130505>
- Moeuf, A. (2018). *Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME* (Publication Number 2018SACLCO25) [Université Paris-Saclay]. Star_Theses-en-ligne-dagrocampus-

ouest_Supmeca_Quartz_Univ-paris8_Univ-paris-lumieres. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01849981>

Mohamed Yousuf, S., & Abdulhalem, R. A. (2019). Asset management in power network towards optimization performance using integrated, intelligent and automated (lia) scheme. *International Journal of Scientific & Technology Research (IJSTR)*, 8(11), 2372-2375. <https://www.ijstr.org/final-print/nov2019/Asset-Management-In-Power-Network-Towards-Optimization-Performance-Using-Integrated-Intelligent-And-Automated-lia-Scheme.pdf>

Mohammadi, A., Igwe, C., Amador-Jimenez, L., & Nasiri, F. (2018). Novel Asset Management Framework for Road Maintenance. CSCE Conference 2018, (pp. 481-489). Fredericton, Canada: CSCE. https://csce.ca/elf/apps/CONFERENCEVIEWER/conferences/2018/pdfs/Paper_TR49_06_10045716.pdf

Moradkhani, A., Haghifam, M. R., & Mohammadzadeh, M. (2014). Failure rate modelling of electric distribution overhead lines considering preventive maintenance [Article]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(6), 1028-1038. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0570>

Ouertani, M.-Z., Parlikad, A. K., & McFarlane, D. C. (2008). Towards an approach to Select an Asset Information Management Strategy. *International Journal of Computer Science and Applications (IJCSA)*, 5(3b), 25-44. https://www.academia.edu/1877492/Towards_an_approach_to_select_an_asset_information_management_strategy

Parlikad, A. K. (2019). Research challenges in Asset Management. In C. Lloyd & M. Corcoran (Eds.), *Asset Management, Second edition* (pp. 45-66). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/amse.61439.045>

Pellerin, F., Grandjean, B., & Cahier, M. L. (2019). *Organisation et compétences dans l'usine du futur: vers un design du travail ?* Presses des Mines-Transvalor. <https://books.google.ca/books?id=ysSqywEACAAJ>

Petchrompo, S., & Parlikad, A. K. (2019). A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 181, 181-201. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.09.009>

- Peterson, S. B. (2006). The future of asset management. In J. Mathew, J. Kennedy, L. Ma, A. Tan, & D. Anderson (Eds.), *Engineering Asset Management* (pp. 460-472). Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-814-2_50
- Reid, M., & Cook, B. (2016). The Application of Smart, Connected Power Plant Assets for Enhanced Condition Monitoring and Improving Equipment Reliability. Proceedings of the ASME Power Conference, June 26–30, 2016, (pp. V001T005A006). Charlotte, North Carolina, USA: American Society of Mechanical Engineers (ASME). <https://doi.org/10.1115/POWER2016-59189>
- Rinaldi, G., Thies, P. R., Walker, R., & Johanning, L. (2017). A decision support model to optimise the operation and maintenance strategies of an offshore renewable energy farm. *Ocean Engineering*, 145, 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.019>
- Roda, I., & Macchi, M. (2018). A framework to embed Asset Management in production companies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 232(4), 368-378. <https://doi.org/10.1177/1748006X17753501>
- Roda, I., Parlidak, A. K., Macchi, M., & Garetti, M. (2016). A Framework for Implementing Value-Based Approach in Asset Management. Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM) 2015, (pp. 487-495). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_47
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5), 77-90. <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
- Sandu, G., & Samii, B. (2021, 5-8 Dec. 2021). Physical asset management in the fourth industry revolution: mapping the literature for condition-based maintenance. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) - Asia 2021, (pp. 1-5). IEEE Inc. <https://doi.org/10.1109/ISGTASIA49270.2021.9715671>
- Scharl, S., & Praktiknjo, A. (2019). The Role of a Digital Industry 4.0 in a Renewable Energy System. *International Journal of Energy Research*, 43(8), 3891-3904. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.4462>
- Seow, K. S., Nguyen, L. K., Tan, K., & Oeveren, K. V. (2016). Moving towards reliability-centred management of energy, power and transportation assets. 2016 (ACEPT), (pp. 1-7). Singapore: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACEPT.2016.7811520>

SFI. (2024). *What is complex systems science?* Santa Fe Institute (SFI). Retrieved 09 Août 2024 from <https://www.santafe.edu/what-is-complex-systems-science>

Shah, S. W. A., Mahmood, M. N., & Das, N. (2016). Strategic asset management framework for the improvement of large scale PV power plants in Australia. 2016 AUPEC, (pp. 1-5). Brisbane, QLD, Australia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749311>

Shahid, M. A., Mahamood, M. N., & Das, N. (2016). Integrated asset management framework for Australian wind farms. 2016 AUPEC, (pp. 1-5). Brisbane, QLD, Australia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749310>

Shahinzadeh, H., Moradi, J., Gharehpetian, G. B., Nafisi, H., & Abedi, M. (2019). IoT architecture for smart grids. 2019 International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS), Iran, (pp. 22-30). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IPAPS.2019.8641944>

Shen, X., Cao, M., Lu, Y., & Zhang, L. (2016). Life cycle management system of power transmission and transformation equipment based on Internet of Things. 2016 CICED, (pp. 1-5). Xi'an, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7575999>

Silva, C. E. L. d., Narcizo, R. B., Cardoso, R., Gonçalves, L. M., & Carvalho, Y. (2020). Industry 4.0: Proposing A Framework. *Archives of Business Review*, 8(6), 250-267. <https://doi.org/10.14738/abr.86.8541>

Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123, 103335. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>

Simon, H. A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the American philosophical society*, 106(6), 467-482. <http://www.jstor.org/stable/985254>

Sjøbakk, B. (2018). The Strategic Landscape of Industry 4.0. In M. Ilkyeong, M. L. Gyu, P. Jinwoo, K. Dimitris, & C. Gregor von, IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS), (pp. 122-127). Seoul, South Korea: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99707-0_16

Suakanto, S., Nuryatno, E. T., Fauzi, R., Andreswari, R., & Yosephine, V. S. (2021). Conceptual Asset Management framework: A Grounded Theory Perspective. 2021 International Conference Advancement in Data Science, E-Learning and Information Systems, ICADEIS

2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
<https://doi.org/10.1109/ICADEIS52521.2021.9701948>

Too, E. G. (2012). Strategic Infrastructure Asset Management: The Way Forward. *Engineering Asset Management and Infrastructure Sustainability*, (pp. 945-958). Springer, London.
https://doi.org/10.1007/978-0-85729-493-7_73

Trindade, M., & Almeida, N. (2018). The impact of digitalisation in asset-intensive organisations. *Network Industries Quarterly*, 20(4), 14-17. <https://www.network-industries.org/wp-content/uploads/2019/07/The-impact-of-digitalisation-in-asset-intensive-organisations.pdf>

Trist, E. L. (1981). *The Evolution of Socio-Technical Systems: A Conceptual Framework and an Action Research Program* (Vol. 2). Ontario Quality of Working Life Centre.
<https://ia800202.us.archive.org/21/items/39120320010110/39120320010110.pdf>

UIC. (2016). *UIC Railway Application Guide - Practical implementation of Asset Management through ISO 55001*. International Union of Railways (UIC).
https://uic.org/IMG/pdf/iso_55000_implementation_guidelines_on_railways_infrastructure_organisations.pdf

Vahedi, M., & Movahedi, M. M. (2018). Evaluating and Prioritizing Asset Management Excellence Model Based on Critical Criteria Using the Combination of DEMATEL and ANP Techniques. *Petroleum Business Review*, 2(3), 56-65.
<https://doi.org/10.22050/pbr.2018.93429>

Vermeer, M., Wetzer, J., Wielen, P. v. d., Haan, E. d., & Meulemeester, E. d. (2015). Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, (pp. 1-6). Eindhoven, Netherlands: IEEE.
<https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232556>

Vom Brocke, J., van der Aalst, W., Grisold, T., Kremser, W., Mendling, J., Pentland, B., Recker, J., Roeglinder, M., Rosemann, M., & Weber, B. (2021). Process science: the interdisciplinary study of continuous change. *Social Science Research Network (SSRN) electronic journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3916817>

Wardani, N. U. A., & Naswil, S. (2017). Transmission asset lifecycle management in PLN TJBB. 2017 ICHVEPS, (pp. 95-98). Denpasar, Indonesia: IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICHVEPS.2017.8225920>

Wijnia, Y., & de Croon, J. (2015). The Asset Management Process Reference Model for Infrastructures. 9th WCEAM Research Papers, (pp. 447-457). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15536-4_35

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021, 2021/10/01/). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>

Zhang, H., Xue, S., Li, X., Li, R., Zhang, X., & Ma, L. (2020, 4-7 June 2020). Evaluation Model for Life-Cycle Management Capability of Power Grid Corporation's Distribution Equipment Assets. 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), (pp. 1961-1965). Chengdu, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136230>

ANNEXE A - MATRICE DE REVUE DE LITTÉRATURE

Tableau A - 1 : Matrice de revue de littérature

Articles	Laue et al. (2014)	Moradkhani et al. (2014)	Sjøbakk (2018)
Problématique	Point de vue stratégique de la GDA pour une approche globale intégrée	Stratégie de GDA en maintenance, et réduction des coûts et interruptions dans la distribution électrique	Stratégie d'organisation basée sur le concept de l'I 4.0 et compétitivité pour une entreprise manufacturière
Objectif	Présenter une approche intégrée de GDA pour développer un modèle de maturité de capacités selon toutes ses dimensions	Développer un taux de défaillance pour un système de lignes aériennes du point de vue GDA	Faire la synthèse des initiatives de numérisation et d'automatisation en lien avec la stratégie d'organisation
Mots-clés	Modèle de maturité - Indicateurs - Opérationnalisation-Gouvernance	Distribution d'énergie - Fiabilité - Maintenance - Système complexe - Modèle de taux de panne - Stratégie de GDA	Industrie 4.0 - Usine du futur - Réseaux d'approvisionnement numériques
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> - Définition de la GDA, description de ses dimensions, Description d'une approche de GDA intégrée (approche coopérative) - Description des domaines de processus de la GDA intégrée - Développement d'un modèle de maturité de capacités 	<ul style="list-style-type: none"> - Proposition d'un modèle de taux de défaillance du système et des composantes, Estimation des paramètres - Implémentation du modèle dans l'optimisation du planning de la maintenance - Étude de cas 	<ul style="list-style-type: none"> - Étude de rapports publics d'entreprises en conseil de gestion - Définitions et recommandations axées sur les problèmes stratégiques liés à la transformation vers l'I 4.0 - Limites des rapports vs articles, avantages pour les cas pratiques
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> - Conceptualisation d'une GDA intégrée globale par 3 dimensions - 5 niveaux de capacités, et 5 de maturité (comparaison de 19 modèles) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre de GDA nécessaire (valeurs) - Taux de défaillance approprié (lien avec la condition de l'actif) - Réparation partielle 	<ul style="list-style-type: none"> - Impératif de la transformation et engagement à long terme - Cadre de panorama stratégique facilitant le positionnement
Variables indépendantes	<ul style="list-style-type: none"> - Domaines de processus en GDA - Niveau de capacité et indicateur pour chaque domaine de processus - Niveau de maturité et indicateur pour chaque domaine de processus 	<p>Taux de base, facteur d'échelle, âge moyen, temps entre MP, vitesse maximale du vent, charge, longueur, facteurs de coût</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Description de l'I4.0 (vision, stage de développement, impact perturbateur) - Nouvel écosystème numérique (intelligence, transformation des moteurs d'efficacité, états futurs, information) - Digitalisation (connectivité et interaction, avantages, 2 écoles de pensée) - Buts d'entreprise (résultats visés, gestion des données, choix des technologies) - Lien avec d'autres stratégies (non identifié)
Variables dépendantes	Évolution de l'organisation dans la maturité (combinaison capacité et maturité)	Taux de défaillance, planning et coût de maintenance	Approche d'une stratégie de transformation
Résultats	<p>Segmentation et classification des domaines de processus, convenance pour un modèle de maturité de capacités discutables</p> <p>Domaines de processus initiaux non précisés</p>	<p>Meilleurs ajustement et capacité de généralisation, planning et réduction du coût de maintenance</p> <p>Pas de lien établi avec les valeurs</p>	<p>Cadre du panorama stratégique de l'I 4.0 avec alignement</p> <p>Nécessité d'investigations sur la portée et l'applicabilité</p>

Tableau A - 2 : Matrice de revue de littérature (suite 1)

Articles	Sandu et Samii (2021)	S. Islam (2016)	Trindade et Almeida (2018)
Problématique	Stratégie de GDAP et CBM impulsée par les principes de l'I4.0 comme source d'avantage concurrentiel	Criticité des systèmes numériques et technologies de l'information pour l'atteinte des objectifs du réseau intelligent	Alignement des stratégies de GDA et de transformation numérique par l'I4.0 en contexte pour renforcer la réalisation de la valeur
Objectif	Identifier les effets favorables de l'I4.0 sur la GDAP dans la distribution électrique et en CBM	Présenter certaines applications de la technologie numérique et indiquer leur utilité pour la distribution électrique	Indiquer les impacts du processus de transformation numérique en GDA
Mots-clés	CBM - MP - indicateur de condition - système de surveillance - index de santé d'actif - secteur de l'électricité	Réseau intelligent - applications numériques - applications TCI - AMI - gestion de l'électricité	-
Méthodologie	- Revue de littérature: analyse quantitative de textes, complétée d'une revue qualitative, étude de tendances (baisse des publications)	- Définition et fonction du réseau intelligent - Éléments du réseau intelligent : caractéristiques, facilitateurs, bénéfices - Étude de cas	- Enquête (niveaux de maturité numérique, niveaux de confiance souhaités, et résultats) - Questions de recherche (stratégie de transformation numérique axée sur la GDA)
Hypothèses	- Contextualisation de l'I4.0 dans la distribution électrique et CBM comme solution à l'infrastructure vieillissante	- Intégration des technologies et des ressources pour l'étape de transformation	- GDA holistique, intégrée et flexible - Transformation numérique/valeur - Approche technologie / facteur humain
Variables indépendantes	- Lien et coopération via la transparence de l'information - Schémas intelligents de planification - Principes de l'I4.0, technologies associées (interconnexion, automatisation), et facteurs d'impact (durabilité, décisions décentralisées)	- Autoréparation et réseaux résilients - Facilitateurs importants (AMI, AMR, SM, ...) pour implementation du SG - Automatisation et contrôle numériques - Interopérabilité (standard de protection, systèmes électriques), Flexibilité - Capabilités temps réel, Intelligence	- Combinaison TI-TO, collaboration/écosystème, adaptation/modèles d'affaires - Convergence de technologies numériques perturbatrices (connectivité, analytiques avancés et capacités BI, interaction H-M, transfert des instructions numériques au domaine physique), capacités numériques - Numérisation/automatisation, efficacité
Variables dépendantes	Impacts et bénéfices de l'I4.0 dans la distribution électrique sur les plans stratégique (prise de décision, disponibilité, etc.), tactique (planning de maintenance/cycle de vie) et opérationnel (sûreté, fiabilité), intégration	État souhaité (qualité de l'électricité, amélioration de l'efficience et de l'efficacité, maintenance réduite et rapide, système de protection fiable, protection de l'environnement avec clients informés et éduqués)	Transformation numérique (maturité, performance humaine, durabilité, adaptation)
Résultats	Gestion adaptative des actifs physiques et intégration des actions des parties prenantes pour un système énergétique significatif et plus durable	Meilleures efficience, fiabilité, facilité d'exploitation, meilleur RSI, vie prolongée des actifs, électricité fiable, coût abordable, équilibre production/charge, prosommateurs	Difficulté à prédire le future/ approche rapide et remodelage de la transformation numérique, compréhension du contexte changeant et engagement

Tableau A - 3 : Matrice de revue de littérature (suite 2)

Articles	Zhang et al. (2020)	Reid et Cook (2016)	Germán et al. (2014)
Problématique	Capabilités de gestion du cycle de vie pour l'amélioration et le développement du niveau de GDA dans la distribution électrique	Enjeux de la transformation du service public de l'électricité et réalisation de la valeur	Cadres de référence ou directives pour une GDA excellente dans les services publics du secteur de l'électricité
Objectif	Proposer un nouvel ensemble de modèles d'évaluation des capacités de gestion du cycle de vie	Décrire une approche pour créer, et appliquer des actifs connectés intelligents en maintenance	Exploiter la revue de littérature en GDA pour le développement de stratégies et l'implémentation des systèmes de GDA
Mots-clés	Actifs de la distribution – Gestion du cycle de vie – Modèle d'évaluation	-	GDA - système de transmission - transformateur de puissance - système électrique - risque - maintenance
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre d'évaluation des capacités de gestion et optimisation en GDA composé de 2 systèmes: amélioration du niveau de qualité et de l'efficience, gestion des processus et capacités de contrôle - 5 étapes de diagnostic et d'évaluation de la compétitivité (sélection, collecte de données, pondération, scoring, diagnostic) - Étude de cas (5 facteurs sur 6) 	<ul style="list-style-type: none"> - Approche holistique d'amélioration des actifs (personnes-processus-technologies) - Éléments du processus de fiabilité adoptés (INPO) - Programme de fiabilité/directives des processus (EPRI) - Estimation des économies de coût avec grille de risque (EPRI) et 3 scénarios de pannes - Étude de cas 	<ul style="list-style-type: none"> - Revue de littérature: GDA dans le secteur de l'électricité, actifs de transmission, transformateurs de puissance - Méthodologies principales en GDA et caractéristiques - Gestion des transformateurs de puissance: objectif de revue de littérature et bibliométrie, philosophies de maintenance
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> - Principes de construction d'une gestion d'un cycle de vie entier (systémiques, matérialité, disponibilité des données) 	<ul style="list-style-type: none"> - Approche CBM (graphique: concepts de fiabilité/efficience de la maintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre de surveillance étendu en GDA comme préalable
Variables indépendantes	<ul style="list-style-type: none"> - 4 facteurs déterminants du système 1 (O&M, efficience de l'organisation, etc.) pour 16 indicateurs (niveaux 1 à 5) - 2 facteurs déterminants du système 2 (capacité opérationnelle, technologie) pour 11 indicateurs (niveaux 1 à 5) 	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration (actifs critiques-données-processus-personnes) - Connectivité, intelligence, automatisation - Surveillance et diagnostic (notifications, découvertes) - Grille de risque, structure de coût - Criticité 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthodologies de GDA - Caractéristiques des actifs d'électricité, cycle de vie, philosophies de maintenance - Services fournis par la GDA et efforts des parties prenantes
Variables dépendantes	Système d'index d'évaluation (mesure du niveau des capacités de gestion)	Accès à l'information et aperçu (rérospective), stratégie de maintenance optimale, coûts éliminés significatifs, événements liés (sécurité/environnement)	Amélioration de la qualité des services fournis, augmentation de la fiabilité des infrastructures
Résultats	Amélioration/efficacité du modèle, faiblesses et propositions d'amélioration	Décisions informées et améliorées, limite: accès à l'intelligence actionnable pour atteindre la valeur, maintenance	Limites et lacunes de certains outils ou techniques identifiées pour une GDA complète, sensibilité à la littérature disponible

Tableau A - 4 : Matrice de revue de littérature (suite 3)

Articles	Konstantakos et al. (2019)	Biard et Nour (2021)	Mattioli et al. (2020)
Problématique	Variabilité des systèmes actuels de GDA en termes de pratiques au regard de la suite ISO 55000	Questionnement des méthodes et modèles actuels de GDA au profit de l'implémentation de l'I4.0 dans l'industrie électrique	Valeur ajoutée de l'IA dans le processus global de GDA intégrant les coûts du cycle de vie dans les décisions relatives aux actifs et fournissant des informations utiles
Objectif	Fournir un aperçu critique de la discipline de GDA et de ses systèmes, et un aperçu du paysage contemporain dans le domaine	Présenter une analyse des différents modèles de GDA utilisés dans l'industrie électrique, ainsi que les applications possibles de l'I4.0, en s'appuyant sur une revue de la littérature	Améliorer la gestion du cycle de vie des actifs avec une IA répondant au continuum des contraintes
Mots-clés	Systèmes de GDA - ISO 55000 - PAS 55 - international infrastructure management manual (IIMM)	I4.0 - GDA - prise de décision - gestion du cycle de vie des actifs - gestion du risque - réseau intelligent - systèmes complexes - données massives	GDA - maintenance - SCM - IA - IA axée sur les données - ML - IA symbolique - IA basée sur les connaissances - Multicritères - prise de décision - Planification - Ontologie
Méthodologie	- Chronologie de la discipline de GDA - Nature stratégique de la GDA - Aperçu de systèmes viables de GDA AMS (ISO 55001, PAS 55, and IIMM) - Nature générique de la suite ISO 55000	- Revue de littérature : GDA et modèles appliqués dans l'industrie électrique (cycle de vie, décision et risques), I4.0, concepts, outils et impacts, application en GDA et dans l'industrie électrique	- Description des méthodes d'IA et focus - Méthode de décision multicritère avec indicateurs clés de performance financiers et de capacités (Myriad) - Enquête (détermination des indicateurs)
Hypothèses	- GDA approche évolutive, moderne de la gestion axée sur la valeur et le cycle de vie - processus interdisciplinaire, conjoint, et actifs comme sources de valeur	- Application d'un modèle de GDA intégré par le producteur d'énergie, le transporteur et le distributeur d'énergie	- Utilisation de l'IA pour une meilleure GDA et anticipation par l'information actionnable - Identification de stratégies de gestion axées sur l'objectif et la valeur ajoutée
Variables indépendantes	- Standardisation: définitions, terminologies, meilleures pratiques largement identifiées et appliquées (contexte) - Consensus global à partir de la suite ISO 55000	- Principes et outils de l'I4.0 dans l'industrie électrique (prévision de la demande, fiabilité, simulation/facteurs de risque, etc.) - Surveillance en temps réel/cycle de vie (données massives sur les actifs et l'électricité, confidentialité, maintenance prédictive, optimisation, priorisation, etc.)	- Données historiques sur les actifs (dégénération, défauts, opération, diagnostic), demande - KPI opérationnels, économiques et de durée de vie des actifs en temps réel (MTBL, MTBF) - Disponibilité des ressources (humaines, collecte de données, connaissances)
Variables dépendantes	Réduction des complexités dans les systèmes de GDA	Contribution de l'I4.0 : performance des actifs, coûts et risques interreliés	Efficiency, performance, planning de maintenance, coûts
Résultats	Suite ISO 55000 comme un système minimum de GDA acceptable, différences structurelles des systèmes de GDA comparés à l'ISO 55001, aucune évidence sur les bénéfices de l'implémentation de la suite ISO	Amélioration de la qualité et de la disponibilité de l'électricité, support de la prise de décision, besoin d'intégration dans un modèle de GDA global pour toute la chaîne	EAM avancée optimisant la traduction des objectifs de l'organisation dans les décisions relatives aux actifs grâce à l'IA : Maintenance prédictive, prescriptive, gestion complète du cycle de vie, etc.

Tableau A - 5 : Matrice de revue de littérature (suite 4)

Articles	El Bounjimi & Nour (2021)	Shah et al., (2016)	Shahid et al., (2016)
Problématique	Exigences pour la mise en œuvre d'une gestion d'actifs efficace et intelligente	Structure d'un cadre de GDA stratégique des centrales PV à grande échelle selon le contexte	Cadre systématique de GDA garantissant les rendements de la production éolienne et son potentiel
Objectif	Passer en revue les principales technologies et solutions facilitant une GDA intelligente dans l'industrie électrique	Proposer un nouveau cadre de GDA stratégique pour l'amélioration des centrales PV	Développer un cadre de GDA intégrée afin d'assurer une durée de vie optimale des actifs conservant une haute valeur
Mots-clés	GDA - Technologies numériques - I4.0 - Industrie électrique - Revue	Cadre des actifs - Cycle de vie des actifs - ISO 55000 - AAMCoG - ISAM - Centrales PV	GDA - AAMCoG - AMC - ISO 55000 - Énergie renouvelable
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> - Question de recherche et RL - Définition du concept de GDA intelligente dans le contexte de l'industrie électrique - Passage en revue des principales technologies numériques et solutions facilitant une GDA intelligente 	<ul style="list-style-type: none"> - Question de recherche - Comparaison: capacités de champs PV - Comparaison: cadres de GDA stratégique - RL systématique (RLS) sur les centrales PV à grande échelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Discussion: éléments des cadres existants - RLS (lacunes et pratiques récentes) dans l'industrie éolienne - Discussion: cadres existants (spécificités) - Description du cadre de GDA intégrée
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre et dimensions d'une GDA 4.0 	<ul style="list-style-type: none"> - Effets significatifs des phases de cycle de vie en amont sur l'aval - Cadre ISAM spécifique pour les actifs PV 	<ul style="list-style-type: none"> - Spécificité : ISO (noyau, approche intégrée), AMC (aspects techniques, encadrement des PP), et AAMCoG (collaboration, politique pro-gouvernementale, et gestion des connaissances)
Variables indépendantes	<ul style="list-style-type: none"> - Exigences d'une SAM (réglementaires, criticité des actifs, organisationnelles/données et types de décisions, échelle) - intelligence technologique - transformation numérique, - technologies principales et capacités (temps réel, connectivité, etc.), PdM, diverses sources de données 	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel (rayonnement solaire) - Transparence de la planification - processus de cycle de vie - Intégration des 6 éléments clés (politique gouvernementale, gestion stratégique de l'organisation, gestion des connaissances, GDA et plans, prestation de services, évaluation) et leurs liens 	<ul style="list-style-type: none"> - Éléments principaux de GDA - Relations, Compatibilité, Vue stratégique, Automatisation (collecte/analyse données) - Conceptualisation des biens publics et combinaison/système global des résultats de services - Spécificités (sélection de site, agrément, limites/accessibilité)
Variables dépendantes	Architecture IT-IoT d'une SAM, Efficacité (bénéfices: coût, qualité de service, identification des risques), flexibilité des décisions	Cadre de GDA stratégique, Capacité améliorée des processus	Cadre de GDA intégrée, Efficience et pratique, Efficacité de la GDA des parcs, Qualité de service, Durabilité
Résultats	Stratégies d'actifs à repenser, valeur ajoutée des données collectées,	Réduction/dépenses de cycle de vie Amélioration des prestations de services pour des normes spécifiques, Évaluation (forces et faiblesses) des processus actuels et pratiques, Analyse critique du SGDA	Risque partagé (agrément), Avantage des sites off-shore, pas d'effets sur la santé, Spécificités actifs/sites et politiques, Conformité/conceptions (éoliennes et parcs) avec la politique gouvernementale

Tableau A - 6 : Matrice de revue de littérature (suite 5)

Articles	Gaha et al., (2021)	Vahedi & Movahedi, (2018)	Liboni et al., (2018)
Problématique	Méthodologie globale combinant les concepts de GDA et de résilience pour les services publics d'électricité	Évaluation et priorisation multicritères d'un modèle de GDA, en vue du choix, dans un contexte de compétitivité	Gestion des changements relatifs à l'I4.0 et atteinte des objectifs d'exploitation durable pour l'industrie des systèmes électriques
Objectif	Présenter une nouvelle approche intégrant le comportement d'un actif et la Valeur de la charge perdue (VoLL) liée au profil du risque	Évaluer et prioriser des modèles d'excellence, et identifier leurs capacités sur la base de critères à partir de techniques de décision	Relever les défis sur la protection de l'environnement (PE) et la sécurité des processus (SP), et les capacités nécessaires pour soutenir la nouvelle révolution industrielle
Mots-clés	GDA - Complexité - VoLL - Services publics d'électricité - maintenance - Fiabilité - RIDM	Modèle d'excellence de GDAP - Normes ISO 55000 - DEMATEL - ANP	PE - SP - Service public d'électricité - Système électrique - I4.0 - SSM - Capacités dyn.
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> - Description de l'approche globale du RIDM - Description de la méthodologie du comportement de l'actif et de l'approche de calcul de la VoLL - Étude de cas 	<ul style="list-style-type: none"> - 2 Questions de recherche : priorisation des modèles, priorité de chacun/critères - 4 critères (ISO 55000) et 2 (interview de 10 experts, Méthode DEMATEL (mesure de la dépendance et des poids des critères), Méthode ANP (priorisation par combinaison les critères)) 	<ul style="list-style-type: none"> - Question de recherche : défis liés aux changements de l'I4.0 (environnement plus durable et des processus sûrs) - Recherche exploratoire (interview/ spécialiste, collecte de données), - SSM (construction des connaissances pour l'aide à la décision)
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> - RIDM en GDA, et intégrant la résilience, base de l'approche proposée - Horizons : long et moyen termes 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèles de GDAP selon ISO 55000 (IAM, AIM, LOE, Uptime), Reconnaissance de critères critiques selon ISO 55000 	<ul style="list-style-type: none"> - Pratiques modernes de gestion efficiente des services de future génération (modèle conceptuel du service intelligent : information et pratiques de GDA)
Variables indépendantes	<ul style="list-style-type: none"> - Seuil, facteur (intervalle d'inspection ou stratégie en maintenance) - Connaissances d'experts, données sur les interruptions planifiées ou non (défaillances, maintenance) - Limites opérationnelles et réserves - Énergie non délivrée et catégorisation 	<ul style="list-style-type: none"> - 6 Critères critiques: coût, risque, performance, durabilité (ISO 55000), simplicité, connaissances (experts) - Contexte de fonctionnement de l'organisation (valeurs, sensibilité à certains critères) 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigences de l'I4.0 (standardisation et stabilité des processus, transparence, 2 principes, 3 préalables) et technologies - 5 Facteurs de changements, Modernisation et 3 capacités dynamiques, partenariat, Collaboration, Contexte, 6 Spécificités, Pensée systémique, SGDA structuré
Variables dépendantes	Taux/défaillance prédit, indisponibilité/arrêts: durées et fréquences, Violations/limites et charges, ou ajustement, VoLL, coûts (total et par catégorie) et événements préventifs	Priorisation (ou hiérarchisation) des modèles Priorité de chaque modèle (critère prépondérant)	Transformation (service public intelligent pour un environnement protégé et processus sûres) : durabilité, fiabilité, efficience, sécurité, résilience, optimalité
Résultats	Possibilité de recalculer le taux de défaillance pour de nouvelles enquêtes, Besoin d'examiner les relations entre les stratégies de GDA et de résilience : effet des intervalles d'inspections en maintenance sur la VoLL	Critères de grand impact (connaissances), de faible impact (coût), Importance du SGDAP avec une approche de cycle de vie pour la création de valeur, et de la décision en vertu de son choix, Transférabilité de l'analyse	Lacunes de gestion et modèles de gestion possibles contribuant à la modernisation des services publics d'électricité

Tableau A - 7 : Matrice de revue de littérature (suite 6)

Articles	Brown & Humphrey (2005)	IAM (2015)	Komljenovic et al. (2016)
Problématique	Approche complète et robuste de GDA en réponse aux entreprises de transmission et de distribution exploitant des actifs intensifs	Intégration d'une discipline de GDA holistique et émergente pour les personnes et leurs organisations, selon sa portée et son concept	Approche alternative (robustesse et résilience) dans le contexte de la GDA face au risque concernant les systèmes adaptatifs complexes
Objectif	Discuter sur la GDA en faveur des entreprises de transmission et de distribution	Apporter des informations visant une connaissance pratique de la structure de la GDA et de ses sujets, en tant que discipline	Développer une approche holistique pour l'identification, la caractérisation et le traitement des EREs en GDA, dans un environnement complexe
Mots-clés	-	-	GDA – Événements rares et extrêmes (EREs) – Systèmes adaptatifs complexes (CAS) – Incertitudes – Risk-Informed Decision-Making (RIDM)
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation des buts et objectifs de GDA, d'un cadre d'entreprise, des compétences pratiques nécessaires; - discussion sur l'aptitude de la GDA à traiter des problèmes pertinents 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement d'un modèle conceptuel, au niveau stratégique accessible à toute l'organisation, pour un grand nombre de secteurs et la mesure de performance - Activités, liens et portée du SGDA 	<ul style="list-style-type: none"> - RL GDA, EREs, CAS et complexité (théorie) - Modèle global du RIDM et contexte du risque, évaluation et traitement d'EREs en GDA; selon ISO 31000 - 2 études de cas : risque d'interruptions électriques (distribution HQ, statistiques), annulation de projet (centrale nucléaire)
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> - Pertinence de la GDA pour les compagnies de transmission et distribution d'électricité 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle standard d'un système de GDA (SGDA), selon les 6 groupes et 39 sujets du GFMAM, conformité à ISO 55000 	<ul style="list-style-type: none"> - Concept du RIDM, modèle holistique pour la décision, capable de saisir la complexité globale de l'environnement des affaires et opérationnel
Variables indépendantes	<ul style="list-style-type: none"> - Performances, risques et budgets cibles - Mutualisation des compétences 	<ul style="list-style-type: none"> - Pour le SGDA : coûts, efficacité, fréquence des actions, niveau d'inventaire, ENS, indisponibilités, incertitudes, risques, performances, opportunités - Pour les actifs : taux de défaillance, seuil 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveaux de risque (facteurs qualitatifs et quantitatifs de risque d'EREs, incertitudes, relations et importance), seuils, - Période ou cycle de vie
Variables dépendantes	Planning de capital, d'exploitation, de maintenance	<p>Pour le système de GDA : maturité des processus, non-conformités, valeur (bénéfices)</p> <p>Pour les Actifs : condition</p>	Impact et gravité des conséquences (ex. Perte de production, plan stratégique et projet), résilience et robustesse
Résultats	Planification d'actifs comme une nouvelle fonction en alignement avec la GDA	Adoption satisfaisante dans plusieurs pays, amélioration de la discipline, convergence, langage commun aux équipes, équipes transversales	Alternative aux limites de méthodes traditionnelles, complémentarité, et amélioration de la GDA (planification stratégique ou décision) selon les informations sur le risque

Tableau A - 8 : Matrice de revue de littérature (suite 7)

Articles	Petchrompo et Parlakad (2019)	Silva et al. (2020)	Bale et al. (2015)
Problématique	Caractérisation des systèmes d'actifs multiples pour l'efficacité du système global d'un point de vue maintenance	Cadre systématique de connaissances et d'analyse du concept de l'I4.0	Compréhension des systèmes énergétiques et leurs transitions par la science de la complexité pour la durabilité
Objectif	Faciliter la recherche d'études d'intérêt aux lecteurs, par une revue des classes d'actifs multiples en mettant l'accent sur les interactions possibles	Développer un cadre de synthèse et systématique des relations entre principales caractéristiques, les technologies, les produits et les modèles d'affaires du 4.0	Passer en revue l'application des méthodes de la science de la complexité dans la compréhension des systèmes énergétiques et leur évolution
Mots-clés	GDA - Maintenance - Multi-unités - Multi-actifs - Flottes - Portfolios - Dépendances de systèmes - Multi-objectifs - Optimisation - Analyse de décision multicritère	I4.0 - Innovation - Cadre - Technologie	Science de la complexité - systèmes énergétiques - Modélisation - Systèmes adaptatifs complexes (SACs) - Modélisation à base d'agents - Politique énergétique
Méthodologie	- RL et amélioration des définitions et classifications des systèmes (unités multiples, actifs multiples), - synthèse des classes de décision, méthodes de résolution et critères en relation avec les catégories de systèmes	- Analyse quantitative d'articles académiques - Analyse qualitative d'articles et de rapports techniques (vision technologique appliquée dans l'industrie, vues du concept/termes et convergence)	Contexte des systèmes énergétiques (multiplicité des acteurs ou PP, interactions, changements) et complexité - Approches de modélisation et applications dans le domaine énergétique - Complexité et durabilité
Hypothèses	- Systématisation d'études futures sur les classes d'actifs	- Comparaison I4.0 (Allemand) et advanced manufacturing (US) non-synonymes	Systèmes énergétiques comme SACs - Systèmes ouverts
Variables indépendantes	- Classes d'actifs et caractéristiques (définitions, structures, dépendances et ressources partagées : budgets, main d'œuvre, recharges)	- 6 principes de l'I4.0 - Technologies - 3 approches de l'I4.0	- Approche intégrée, complexité - Contexte/écosystèmes: PP, réseaux, données, incertitudes; évaluation des propriétés systémiques - Collaborations, supports vs barrières - Apprentissage, adaptation, pensée systémique - Types de modèles, technologies
Variables dépendantes	Classes de décision, impacts sur la modélisation (fiabilité, optimisation), les parties prenantes (objectifs, priorités), les mesures de performances, la production ou la maintenance	9 thèmes technologiques et nouvelles technologies associées, cadre de l'I4.0	Résilience, robustesse, efficience, sécurité, stabilité structurelle, durabilité
Résultats	A- interactions plus apparentes (systèmes à composantes multiples), dépendances de ressources (systèmes à actifs multiples) B- approche par les données et la valeur des composantes pour la décision	Discussion: risques associés à l'I4.0 (destruction entreprises et emplois consolidés vs nouvelles opportunités d'affaires, nouveaux modèles d'organisation), potentiel perturbateur, impact sur la compétitivité	Incorporation par la science de la complexité de comportements non considérés comme rationnels d'un point de vue économique; aide à la compréhension des systèmes énergétiques, éclairage aux politiques, et à la prise de décision

Tableau A - 9 : Matrice de revue de littérature (suite 8)

Articles	Silvestri et al. (2020)	Xu et al. (2021)	Antalová et al. (2022)
Problématique	Aspects critiques des tendances futures de la mise en œuvre du concept de maintenance 4.0 dans une usine intelligente	Alignement de l'I 4.0 et de l'I 5.0 : co-existence dans une révolution sociotechnique	Exigences (moyens ou conditions) pour une gestion de haute performance
Objectif	Examiner la littérature sur l'état de l'art des technologies de l'I 4.0 utilisées dans les tâches de maintenance et opportunités	Déterminer le paysage occupé par l'I 4.0 et l'I 5.0, et leurs intersections	Développer un cadre théorique de l'Organisation Apprenante (LO) pour l'étude expérimentale et offrir un modèle en accord avec la transformation organisationnelle
Mots-clés	Stratégies de maintenance - I4.0 - Systèmes de fabrication intelligents - Usine intelligente - Revue systématique - Auto-maintenance - Connaissances - Simulation-optimisation	Révolution industrielle - I 4.0 - I 5.0 - Axe sur la valeur	Organisation apprenante - Changement organisationnel - Compétences des employés - Conditions de travail - Développement durable
Méthodologie	- Contexte sur la gestion de la maintenance et les 9 piliers technologiques de l'I 4.0 - Question de recherche : évolution de la maintenance / aux technologies de l'I 4.0 - Revue systématique de la littérature (SLR)	- 5 Questions de recherche - Compréhension de l'I 4.0 (RAMI 4.0, principaux focus, approche) - Compréhension de l'I 5.0 (origine, concept, valeurs centrales, technologies facilitatrices, défis et réponses)	- RL sur LO, lacunes des méthodologies et questions de recherche - Questionnaire et données (diagnostics problèmes et barrières à l'implémentation d'un processus d'apprentissage - Statistique et régression pour vérifier les relations entre les indicateurs)
Hypothèses	Liste des technologies de l'I 4.0 (9 piliers) - Norme européenne EN 17007:2017 pour cartographier les processus de maintenance	I 4.0 et I 5.0 : 2 initiatives ou stratégies	Théorie de LO (conditions de travail et compétences professionnelles des employés dans le processus de changement)
Variables indépendantes	Compréhension des piliers et des applications associées pour les processus et critiqués - Nouveaux paradigmes dans la gestion - Rôle opérateur 4.0 (implications sociotechniques) - Complexité de l'intégration des systèmes	- 3 Valeurs centrales pour une approche systémique (centrée sur l'humain, durabilité, résilience) - 6 Technologies facilitatrices adaptables à l'humain	- Conditions de travail et compétences professionnelles conduisant à 10 indicateurs - Barrières ou risques à l'implémentation d'une LO
Variables dépendantes	Gestion du changement (réorganisation) de la maintenance dans le contexte I4.0 - Optimisation des objectifs (disponibilité, utilisation des ressources) - Amélioration de la connaissance de l'état de santé des actifs	Création de la valeur pour toutes les PP à partir de la technologie	Modèle d'implémentation d'une LO (étapes) et moyens de surveillance des changements mis en œuvre
Résultats	- 3 fondamentaux : IIoT, intégration systèmes et CC - Bénéfices dans la gestion - Aspect critique de la transformation de la maintenance, pour l'opérateur 4.0 - Vision claire pour une transformation consciente de sa gestion de la maintenance	Focus de l'I 4.0 sur les technologies individuelles, focus de l'I 5.0 sur une approche systémique; co-existence, avec les technologies comme des outils facilitateurs et adaptés pour satisfaire les besoins sociétaux comme le but ultime	1/ Proposition d'un modèle universel d'implémentation en accord avec la stratégie de développement. 2/ Employés ayant les compétences professionnelles pour une LO actifs pour supporter les changements attendus