

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

OPTIMISATION DES INVESTISSEMENTS EN GESTION DES ACTIFS AVEC
L'INDUSTRIE 4.0

THÈSE PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU
DOCTORAT EN INGÉNIERIE

PAR
GABRIELLE BIARD

JUIN 2024

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

DOCTORAT EN INGÉNIERIE – CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL (PH.D.)

Direction de recherche :

Georges Abdul Nour, Ph. D., UQTR	Directeur de recherche
----------------------------------	------------------------

Dragan Komljenovic, Ph.D., IREQ	Codirecteur de recherche
---------------------------------	--------------------------

Jury d'évaluation

Georges Abdul Nour, Ph. D., UQTR	Directeur de recherche
----------------------------------	------------------------

Yvan Beauregard, Ph.D., ETS	Président du jury
-----------------------------	-------------------

Toualith Jean-Marc Meango, Ph.D., IREQ	Évaluateur externe
--	--------------------

François Gauthier, Ph.D., UQTR	Évaluateur interne
--------------------------------	--------------------

Dragan Komljenovic, Ph.D., IREQ	Codirecteur de recherche
---------------------------------	--------------------------

Thèse soutenue le 20 juin 2024

REMERCIEMENTS

Au terme de ce parcours académique, j'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Georges Abdul Nour, pour son accompagnement exceptionnel, sa disponibilité et ses conseils éclairés. Son expertise et son soutien ont été des atouts majeurs dans l'aboutissement de ce travail de recherche.

Je tiens également à remercier mon codirecteur de recherche, Dragan Komljenovic, dont l'expertise, le support et les connaissances ont enrichi la démarche de recherche et la méthodologie.

Je remercie également les membres du jury pour leur disponibilité et leur évaluation rigoureuse et objective de mon travail. Vos commentaires et suggestions constructives ont permis d'améliorer la qualité de la recherche et des résultats.

Un merci spécial aux membres de l'entreprise de l'étude de cas qui ont participé à la réalisation de l'étude et à la collecte de données. Votre collaboration a été un élément clé dans l'obtention des résultats présentés dans cette thèse.

Enfin, je souhaite remercier tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de ce processus. Votre présence et votre soutien ont été une source constante de motivation.

RÉSUMÉ

La gestion des actifs est un défi pour les organisations qui possèdent de multiples actifs de différents types, catégories et complexités. Elles doivent faire face à des enjeux qui les obligent à revoir la façon dont elles gèrent leurs actifs. Parmi ces enjeux, il y a une demande croissante d'efficacité, de performance et de qualité des produits ou des services. En plus, elles sont soumises à des contraintes liées à l'environnement externe. Pour maintenir un équilibre entre les performances attendues, les ressources nécessaires et les risques associés, il faut optimiser la distribution des ressources selon les objectifs globaux des organisations. Dans ce contexte, les outils de l'Industrie 4.0 pourraient offrir des avantages significatifs.

Cette recherche propose donc de développer un cadre méthodologique fondé sur les outils de l'industrie 4.0 pour aider à la prise de décision concernant les investissements dans le domaine de la gestion des actifs. La méthodologie de priorisation proposée est appliquée dans une étude de cas dans une entreprise qui produit, transporte et distribue de l'électricité.

Cette recherche se démarque par la diversité des actifs et des activités qu'elle couvre. La littérature est limitée en ce qui concerne les méthodes d'optimisation de l'allocation des ressources pour un portfolio d'actifs de différentes catégories, à tous les stades du cycle de vie. L'impact de l'industrie 4.0 dans ce domaine est également peu traité dans la littérature.

La recherche se différencie aussi par la prise en compte de critères qualitatifs et quantitatifs multiples. Ainsi, les méthodes de décision multicritères et les indicateurs de comparaison des projets d'investissement sont étudiés. Il est observé que la méthode la plus adaptée pour ce contexte est la méthode AHP, associée à la méthode de la somme pondérée. Comme la prise de décision en gestion des actifs doit considérer les risques, les méthodes utilisées pour évaluer la criticité des actifs sont analysées afin d'identifier une méthode reconnue et robuste pour évaluer ce paramètre. Il est observé que la méthode optimale dépend des données disponibles et de l'objectif de l'analyse. Elle peut toutefois

être améliorée par l'utilisation d'outils de l'industrie 4.0, tels que l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle.

Mots clés: Gestion des actifs, Industrie 4.0, Prise de décision, Multicritère, Portfolio d'actifs, Industrie électrique, Entreprise d'électricité, Fiabilité, Projets d'investissements, Priorisation, AHP.

ABSTRACT

Asset management is a challenge for organizations with multiple assets of different types, categories and complexities. They are faced with issues that force them to rethink the way they manage their assets. These challenges include a growing demand for efficiency, performance and product or service quality. In addition, they are subject to constraints linked to the external environment. To maintain a balance between expected performance, required resources and associated risks, it is necessary to optimize the distribution of resources according to the organizations' overall objectives. In this context, Industry 4.0 tools could offer significant advantages. This research therefore proposes a methodological framework based on Industry 4.0 tools to assist investment decision-making in asset management. The proposed prioritization methodology is applied in a case study in the electrical industry.

This research stands out for the diversity of assets and activities it covers. The literature is weak on resource allocation optimization methods for a portfolio of assets of different categories, at all stages of the life cycle. The impact of Industry 4.0 in this area is also not widely covered in the literature. The research also stands out for its consideration of multiple qualitative and quantitative criteria. In this way, multi-criteria decision-making methods and indicators for comparing investment projects are studied. It is observed that the most suitable method for this context is the AHP method, combined with the weighted sum method. As asset management decision-making must consider risk, the methods used to evaluate asset criticality are analyzed in order to identify a recognized and robust method for assessing this parameter. It is observed that the optimal method depends on the available data and the objective of the analysis. It can, however, be improved using Industry 4.0 tools, such as the use of artificial intelligence algorithms.

Keywords: Asset management, Industry 4.0, Decision making, Multicriteria, Asset portfolio, Power industry, Reliability, Investment projects, Prioritization, AHP.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
Abstract	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
CHAPITRE - 1. Introduction.....	1
1.1. Problématique de recherche	2
1.2. Questions de recherche.....	4
1.3. Objectifs de recherche	4
CHAPITRE - 2. Revue de littérature	5
CHAPITRE - 3. La gestion des actifs	12
3.1. Normes et organisations	12
3.2. Définitions	12
3.3. La gestion des actifs physiques	13
3.4. Modèles de gestion des actifs existants	15
3.4.1. L'intégration de la gestion des actifs au cœur de l'organisation ...	16
3.4.2. Classification des niveaux de décision et d'actions.....	17
3.4.3. Prise de décision en gestion des actifs en tenant compte des risques	19
3.4.4. Gestion des informations	20

CHAPITRE - 4. Industrie 4.0 et la gestion des actifs	21
4.1. Définitions	21
4.2. Structure, concepts et outils.....	22
4.3. L'industrie 4.0 dans les activités de gestion des actifs.....	26
4.3.1. Maintenance prédictive.....	26
4.3.2. Évaluation de l'état	28
4.3.3. Priorisation des activités de gestion des actifs selon les risques....	29
4.3.4. Projection de la demande.....	29
4.3.5. Prototypage virtuel.....	30
4.4. Contribution de l'industrie 4.0 pour la prise de décision	31
4.5. Contribution de l'industrie 4.0 dans la gestion des actifs des entreprises d'électricité	32
4.5.1. Contribution des mégadonnées.....	35
4.5.2. Contribution de l'internet des objets.....	36
4.5.3. Contribution des jumeaux numériques	36
CHAPITRE - 5. Méthodologie de recherche	38
CHAPITRE - 6. Cadre méthodologique proposé.....	41
6.1. Étape 1 : Former le comité d'expert et de décideurs	43
6.2. Étape 2 : Identifier les projets à comparer.....	43
6.3. Étape 3 : Évaluer les méthodes d'analyse multicritère applicables.....	44
6.3.1. Méthode AHP	49
6.3.2. Méthode BWM	51

6.3.3.	Méthode de la somme pondérée	51
6.4.	Étape 4 : Définir les critères et leurs paramètres de calcul.....	52
6.4.1.	Critères utilisés dans la littérature.....	52
6.4.2.	Critères utilisés dans l'organisation.....	67
6.4.3.	Critères retenus	67
6.5.	Étape 5. Pondérer les critères	68
6.6.	Étape 6 : Identifier la méthode pour évaluer la criticité des actifs	70
6.7.	Étape 7 : Définir l'échelle d'évaluation par critère	75
6.8.	Étape 8 : Définir les projets prioritaires pour le plan de gestion des actifs	75
6.9.	Étape 9 : Réaliser l'analyse de sensibilité	76
6.1.	Contribution de l'industrie 4.0 au cadre méthodologique.....	77
CHAPITRE - 7. Étude de cas.....		81
7.1.	Étape 1 : Former le comité d'expert et de décideurs.....	81
7.2.	Étape 2 : Identifier les projets à comparer.....	82
7.1.	Étape 3 : Évaluer les méthodes d'analyse multicritères applicables	82
7.2.	Étape 4 : Définir les critères et leurs paramètres de calcul.....	82
7.1.	Étape 5 : Pondérer les critères	85
7.2.	Étape 6 : Identifier la méthode pour évaluer la criticité des actifs	91
7.3.	Étape 7 : Définir l'échelle d'évaluation par critère	92
7.4.	Étape 8 : Définir les projets prioritaires pour le plan de gestion des actifs	92
7.5.	Étape 9 : Réaliser l'analyse de sensibilité	94
CHAPITRE - 8. Analyse et recommandations		97

CHAPITRE - 9. Conclusion.....	102
9.1. Contribution de la recherche	104
9.2. Publications prévues et publiées.....	105
9.3. Recherches futures	105
RÉFÉRENCES.....	109
Annexe A. Modèles de gestion des actifs comparés	144
Annexe B. Étapes de réalisation de la méthode AHP	147
Annexe C. Étapes de réalisation de la méthode BWM	151
Annexe D. Questionnaire de réponse pour la collecte de données	154
Annexe E. Échelles d'évaluation des critères	157

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Types de décision en fonction des phases du cycle de vie des actifs.....	18
Tableau 2 Concepts, possibilités technologiques et outils de l'industrie 4.0.....	24
Tableau 3 Répartition de l'utilisation des méthodes de priorisation multicritère	45
Tableau 4 Objectifs, avantages et inconvénients méthodes d'analyse multicritères identifiées dans la littérature	46
Tableau 5 Comparaison des méthodes d'analyse multicritère utilisées	49
Tableau 6 Critères de comparaison et paramètres de calcul principaux	59
Tableau 7 Critères d'impact de défaillance et éléments d'évaluations associés	65
Tableau 8 Échelle utilisée pour la comparaison des critères pour AHP et BWM	69
Tableau 9 Données requises en fonction de la méthode choisie.....	74
Tableau 10 Critères de performance associés aux orientations stratégiques	84
Tableau 11 Matrice d'évaluation par paire des critères selon la méthode Delphi avec la méthode AHP	86
Tableau 12 Matrice normalisé selon la méthode Delphi et vecteur de priorité avec la méthode AHP	87
Tableau 13 Matrice d'évaluation par paire des critères selon la moyenne géométrique avec la méthode AHP	88
Tableau 14 Matrice normalisé selon la moyenne géométrique et vecteur de priorité avec la méthode AHP	89
Tableau 15 Comparaison par paire du meilleur et pire critère avec la méthode Delphi ..	90
Tableau 16 Pondération des critères avec la méthode BWM	90
Tableau 17 Évaluation des projets en fonction de l'échelle d'évaluation	93

Tableau 18 Score des projets.....	93
Tableau 19 Hiérarchie de priorité des projets	94
Tableau 20 Analyse de sensibilité par méthode.....	95
Tableau 21 Comparaison des éléments clés des modèles de gestion des actifs.....	144
Tableau 22 Comparaison en paire de la contribution des critères sur l'objectif global .	148
Tableau 23 Comparaison en paire de la contribution des projets pour le critère i.....	148
Tableau 24 Indice de cohérence aléatoire	149
Tableau 25 Comparaison en paire de la contribution du pire et du meilleur critère sur l'objectif global.....	152
Tableau 26 Indice de cohérence maximal (CM).....	153
Tableau 27 Échelles d'évaluation à utiliser	154

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Synthèse de la revue de littérature pour la priorisation des activités de gestion des actifs	11
Figure 2 Classification des systèmes formés de plusieurs équipements (Petchrompo & Parlikad, 2019).....	14
Figure 3 Interrelations de la vision corporative et des objectifs de gestion des actifs	17
Figure 4 Hiérarchie des actions et des décisions dans les modèles de gestion des actifs	17
Figure 5 Contributions de l'Industrie 4.0 au modèle de gestion des actifs de l'IIMM pour les entreprises électriques (Modèle adapté de IPWEA (2015)).....	34
Figure 6 Cadre méthodologique proposé	42
Figure 7. Sélection des publications relatives aux méthodes d'analyses multicritères....	44
Figure 8. Sélection des publications relatives aux paramètres de comparaison	53
Figure 9 Répartition des paramètres de priorisation des projets d'investissements	54
Figure 10 Répartition des paramètres d'évaluation de la criticité des actifs	55
Figure 11 Nombre de publications par portée et type de réseau	71
Figure 12 Répartition des méthodes d'évaluation de la criticité	72
Figure 13 Répartition des méthodes d'évaluation de la probabilité de défaillance	72
Figure 14 Répartition des méthodes d'évaluation de l'indice de santé	72
Figure 15 Identification de la méthode d'évaluation de la criticité	73
Figure 16 Contribution des outils de l'industrie 4.0 au cadre méthodologique.....	78
Figure 17 Pondérations des critères selon la méthode AHP et BWM	98
Figure 18 Score des projets selon la méthode utilisée	100

Figure 19 Structure de la hiérarchie du problème avec la méthode AHP.....	147
Figure 20 Structure de la hiérarchie du problème avec la méthode BWM.....	151

LISTE DES ACCRONYMES

AHP	Analytical Hierarchy Process (processus de hiérarchie analytique)
BWM	Best-Worst Method
CHI	Client-heure interrompue
CI	Consistency Index (Indice de cohérence)
CM	Indice de cohérence maximal
CML	Customer minute lost (minutes interrompues par client)
CPS	Cyber Physical Systems (Systèmes cyber physiques)
CR	Consistency Ratio (Ratio de cohérence)
IA	Intelligence artificielle
IdO	Internet des objets
IIMM	International Infrastructure Management Manual
IPWEA	Institute of Public Works Engineering Australasia
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
HQ	Hydro-Québec
PAS	Publicly Available Standard
SAIDI	System Average Interruption Duration Index (Indice de durée moyenne d'interruption du système)
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index (Indice de fréquence moyenne d'interruption du système)
RI	Indice de cohérence de référence
RIDM	Risk Informed Decision Making

CHAPITRE - 1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la mondialisation des marchés force les entreprises à améliorer leur productivité, leur efficacité, ainsi que la qualité de leurs produits ou services. Aujourd'hui, le progrès de la technologie procure des bénéfices de performance qui accentue la pression sur les entreprises pour augmenter l'efficacité. À cette exigence croissante de performance viennent s'associer plusieurs autres défis inhabituels. D'abord, on reconnaît le manque de main-d'œuvre, la transformation des pratiques de travail, la perturbation de l'économie mondiale et de l'inflation. Également, les phénomènes climatiques inhabituels ont mis en lumière les vulnérabilités des infrastructures, des réseaux et des industries en général.

Pour les entreprises ayant des parcs d'actifs importants, les conséquences des enjeux sont indéniables. En effet, l'enjeu du vieillissement des actifs est d'autant plus important, car les risques afférents sont présents sur une plus grande quantité d'éléments. Les investissements pour pallier ces enjeux sont alors substantiels.

Ainsi, des investissements importants en gestion des actifs sont souvent nécessaires afin de maintenir ou d'améliorer la performance des organisations. Dans la majorité des cas, les ressources financières et humaines disponibles sont limitées et ne permettent pas de subvenir à cette augmentation. Une optimisation de la répartition des ressources en fonction des impacts sur l'atteinte de l'objectif global de l'organisation à moyen et long terme est alors nécessaire.

À cet égard, l'arrivée de l'Industrie 4.0 pourrait représenter des bénéfices importants. Entre autres, cette révolution encourage l'utilisation des mégadonnées et d'outils technologiques novateurs dans la prise de décision. On reconnaît toutefois des enjeux relatifs à la qualité ou à la quantité de données disponibles. Ceci complexifie la comparaison de la performance, l'élaboration d'algorithmes efficaces et, ainsi, le processus de prise de décision.

Ainsi, cette recherche vise à développer un modèle d'aide à la décision qui facilitera l'optimisation des dépenses en gestion des actifs. Cette optimisation permettra de prioriser les projets qui répondent davantage aux objectifs corporatifs, aussi diversifiés qu'ils soient et peu importe la phase du cycle de vie des actifs ciblés. Le modèle intégrera également les innovations technologiques de l'industrie 4.0 de manière à améliorer la connaissance de la criticité des actifs.

1.1. Problématique de recherche

Pour plusieurs raisons, l'optimisation des dépenses en gestion des actifs est un défi pour les entreprises qui détiennent des portefeuilles d'actifs de multiples catégories et technologies. Dans ce type d'organisation, on retrouve plusieurs catégories d'actifs hétérogènes, de plusieurs composants, avec des stratégies de maintenance et de remplacement variées. On reconnaît alors un enjeu de dépendance au niveau de la performance atteinte et de la répartition des ressources.

Dans ce contexte, on doit recourir à des méthodes d'analyses avancées pour la prise de décision et la priorisation des investissements, car les mesures de performance habituelles sont incompatibles pour l'ensemble des actifs (Petchrompo & Parlikad, 2019).

Les entreprises du secteur de la production, du transport et de la distribution d'électricité font partie de cette catégorie d'entreprises. Le contexte actuel impose alors plusieurs défis à ces organisations. D'abord, le phénomène de vieillissement des parcs d'actifs des réseaux électriques sera amplifié par l'évolution des changements climatiques. Ces bouleversements représentent également le risque d'une augmentation du nombre d'événements climatiques extrêmes ayant des impacts sur la fiabilité des réseaux (Khaliq, Mahmood, & Das, 2015).

Ensuite, la migration des entreprises vers l'intégration des outils technologiques de l'industrie 4.0, de même que l'électrification des transports, entraîneront des

conséquences sur la demande en électricité des clients, ainsi qu'une croissance des exigences en fiabilité du réseau (Mamun & Islam, 2016).

Face à ces enjeux, les réseaux de production, de transport et de distribution d'électricité requièrent une optimisation des investissements en gestion des actifs, afin de répondre aux objectifs stratégiques des organisations qui gèrent ces parcs d'actifs.

Par contre, bien que le maintien de la fiabilité du réseau représente un des objectifs principaux de ces organisations, on en retrouve plusieurs autres. Les autres objectifs peuvent inclure, entre autres, l'augmentation de la résilience face aux changements climatiques et la réduction des gaz à effet de serres (Hydro-Québec, 2019). Les industries électriques sont alors exposées à des défis organisationnels en termes de répartition des ressources financières et humaines.

Toutefois, une répartition des ressources selon la performance de chaque fonction (production, transport ou distribution) est difficilement réalisable actuellement, car chacune de ces entités suit des indicateurs distincts de performance. Cette multiplicité de mesures complexifie les décisions d'investissements.

Les réseaux électriques sont aussi reconnus comme de grands systèmes complexes étant donné l'ensemble des interrelations entre chacun des éléments qui les composent (Mahmood, Kausar, Sarjoughian, Malik, & Riaz, 2019; Xu, Jia, & He, 2010; Zio, 2016). L'évaluation de la performance d'un système complexe incluant la notion de fiabilité est alors d'autant plus problématique, car elle doit résulter des interactions entre les éléments qui constituent le système, plutôt que par la somme des résultats individuels de chaque élément (Seddari, 2015). Par conséquent, la priorisation des investissements en gestion des actifs dans les entreprises d'électricité représente un défi et doit tenter de limiter l'effet de l'incertitude.

1.2. Questions de recherche

La problématique définie précédemment mène aux questions de recherche suivantes :

1. Comment transformer les modèles de données existants dans le but de fournir des informations pour aider les décisions en gestion des actifs ?
2. Comment l'industrie 4.0 peut supporter la gestion des actifs ?
3. Comment prioriser le partage de ressources entre les projets d'investissement en gestion des actifs dans le but d'atteindre les objectifs de l'organisation ?

1.3. Objectifs de recherche

Dans le but de répondre aux questions de recherche et de traiter les enjeux cités précédemment, l'objectif principal de la recherche est de proposer un cadre méthodologique pour supporter la prise de décision relative aux investissements pour la gestion des actifs dans un système complexe intelligent. Le secteur d'activité ciblé est l'industrie de production, de transport et de distribution d'électricité. Pour ce faire, les sous-objectifs suivants sont établis :

1. Évaluer les outils de l'industrie 4.0 qui contribuent à la gestion des actifs et principalement à la prise de décisions;
2. Recenser et évaluer les méthodes de prise de décision multicritères applicables à la gestion des actifs et les paramètres de comparaison des projets d'investissement;
3. Analyser les méthodes utilisées pour évaluer la criticité des actifs, en fonction de la fiabilité, applicables aux systèmes complexes;
4. Développer une méthodologie de priorisation des projets d'investissement permettant un partage optimal des ressources financières, en fonction de la criticité des actifs et des objectifs globaux des organisations.

CHAPITRE - 2. REVUE DE LITTÉRATURE

La portée de ce chapitre vise à cibler les lacunes actuelles de la littérature et identifier la contribution de la recherche. Considérant le contexte de la présente recherche, une attention particulière a été donnée aux publications dans le domaine de la production, du transport et de la distribution d'électricité.

En ce qui concerne la prise de décision dans la gestion des actifs et l'apport de l'industrie 4.0, il s'agit d'un sujet récent dans la littérature. On retrouve toutefois quelques publications qui proposent des méthodes innovatrices, fondées sur les outils de l'industrie 4.0, pour supporter les décisions en fonction du risque et/ou la fiabilité des actifs.

Cependant, dans bien des cas ces méthodes sont appliquées à une seule famille d'équipements. En effet, Alvarez et al. (2021) présentent une méthodologie basée sur la simulation à partir des distributions de fiabilité de l'équipement étudié. L'étude porte sur les transformateurs de puissance. Catrinu et Nordgård (2010) proposent également une méthodologie d'aide à la décision basée sur le risque. La méthode combine les activités de maintenance et de remplacement d'actifs. Cependant, elle s'applique également à une seule famille d'équipements.

À l'inverse, on retrouve des publications qui adressent spécifiquement les portefeuilles d'actifs, mais dont la portée cible une seule catégorie d'activité, soit l'optimisation de la planification de la maintenance par exemple (Chong, Mohammed, Abdullah, & Rahman, 2019; Jeromin, Birkner, Balzer, & Asgarieh, 2013; Rhein, Balzer, Boya, & Eichler, 2016) Fleckenstein et Balzer (2014).

En ce sens, Clements et Mancarella (2018) présentent un modèle de simulation permettant de prioriser les activités de maintenance dans un contexte de contraintes de ressources. La simulation se base sur la probabilité de défaillance des équipements, ainsi que le temps de réparation. Elle fournit ensuite un indicateur de priorité pour chaque activité de maintenance simulée.

D'autres auteurs visent aussi à utiliser la modélisation pour établir le plan d'investissement optimal en utilisant des approches qui ne considèrent que les coûts du cycle de vie (Hunt, Taylor, Morgan, & Lange, 2020) ou des critères quantitatifs (Cahyo, 2017).

En ce sens, un auteur présente un modèle pour optimiser la répartition des ressources pour la maintenance d'un parc éolien au niveau corporatif (Cahyo, 2017). Le modèle tient compte du partage des ressources pour la maintenance des différents équipements. Il combine également les principes de dynamiques des systèmes et l'analyse du coût du cycle de vie. Toutefois, seuls les éléments de fiabilité, de disponibilité et des coûts sont considérés. Dans ce modèle, chaque action induite est traduite en coûts. L'objectif du problème d'optimisation de la stratégie de maintenance est donc rédigé en fonction de l'atteinte d'un coût minimal. C'est ensuite l'analyse du coût de cycle de vie qui permet de comparer le scénario optimal en fonction d'autres paramètres.

Bien que la prise de décision doive tenir compte du critère monétaire, l'objectif global des organisations porte plusieurs éléments distincts. En outre, on reconnaît la nécessité des modèles de gestion des actifs de considérer l'évaluation des risques (Wheeldon & Hayes, 2012). D'autres critères non monétaires ou plus difficilement quantifiables sont également inclus aux objectifs des organisations.

Ainsi, on observe que les modèles axés vers l'optimisation de l'utilisation des ressources limitées pour aider la prise de décision en gestion des actifs portent sur un seul type d'équipement, ou considèrent un seul facteur lorsqu'ils ciblent plusieurs familles d'actifs. De ce fait, malgré certaines similitudes, aucune publication ne développe une méthodologie visant à optimiser la stratégie de gestion des actifs pour maximiser l'utilisation des ressources en fonction des objectifs globaux des organisations et de l'analyse des risques d'un portfolio d'actifs de multiples catégories. On constate toutefois que la simulation est un des outils prioritaires pour aider la prise de décision en gestion des actifs pour des portfolios d'actifs.

En ce qui a trait aux techniques de modélisation utilisées dans l'industrie 4.0, le défi de la revue de littérature est la faible proportion de publication qui présente des cas réels d'application (Wortmann, Barais, Combemale, & Wimmer, 2020). Les publications présentent principalement des méthodologies théoriques de modélisation et des cas d'application sur des exemples fictifs.

En ce sens, Bosisio, Giustina, Fratti, Dedè et Gozzi (2019) définissent une méthode uniforme pour modéliser la gestion du cycle de vie de l'ensemble des actifs d'un réseau de distribution d'électricité. Cette approche est basée sur le principe de décomposition du système en plusieurs sous-systèmes. Les auteurs définissent bien la méthode pour décomposer le système de distribution en plusieurs sous-systèmes, mais ne proposent pas de méthode de simulation de leur modèle ni de méthode d'optimisation en fonction d'un critère précis.

Également, un outil d'aide à la décision pour les actifs des réseaux électriques basé sur la simulation et les données de fiabilité des actifs a été élaboré par des chercheurs d'Hydro-Québec (HQ) (A. Côté et al., 2019; Gaha et al., 2021). La publication ne présente toutefois pas de méthode pour prioriser les interventions sur les actifs.

Par ailleurs, des outils développés ou utilisés par certains auteurs se concentrent sur la modélisation des flux d'énergie, plutôt que sur l'optimisation de la fiabilité des équipements. Cette modélisation permet toutefois de définir la configuration optimale basée sur la demande future (Butans et Orlovs (2016)). Le niveau de réponse à la demande future est potentiellement l'un des objectifs de l'organisation à tenir compte lors de la priorisation des investissements.

En ce qui concerne l'intégration de multiples critères en lien avec les objectifs globaux des organisations, les propositions adressent l'utilisation de méthode d'analyse multicritères. Les publications qui ciblent les entreprises d'électricité démontrent des gains intéressants en fiabilité du réseau (Soares, Abaide, & Bernardon, 2014).

Entre autres, Soares et al. (2014) s'interroge sur l'utilisation efficace des ressources pour améliorer la performance des réseaux de distribution d'électricité au Brésil. Cet auteur propose une méthodologie basée sur la combinaison de deux méthodes d'analyse multicritère (AHP et PROMETHEE) pour hiérarchiser les projets d'investissement. Les résultats démontrent des gains en fiabilité du réseau. Toutefois, la portée est applicable uniquement aux réseaux de distribution et utilise principalement les données historiques plutôt que la projection de la fiabilité des actifs.

Ensuite, la revue de littérature réalisée par Chong et al. (2019) identifie les méthodes appliquées dans le domaine de la priorisation des activités de maintenance uniquement. Les auteurs concluent que le processus de hiérarchie analytique (AHP) est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'analyse multicritère et précisent les critères de comparaison applicables dans leur contexte. La méthode d'analyse multicritère, notamment l'AHP, est aussi utilisée pour prioriser les projets d'investissement dans plusieurs types d'organisation. (Da Silva Neves & Camanho, 2015) démontrent son application pour les projets d'informatiques.

Ainsi, en ce qui concerne les autres critères d'évaluation des projets d'investissement, Gutiérrez, Santis, Martínez et Villamizar (2019) utilisent une revue de la littérature pour identifier les mesures de performance dans les industries du gaz et du pétrole et la méthode AHP pour les classer par importance.

Combinant les observations des modèles permettant l'optimisation de l'utilisation des ressources, ainsi que les méthodes d'analyse multicritères, on constate que les méthodes intègrent principalement le critère de fiabilité ou de criticité des actifs pour aider la prise de décision. L'évaluation de l'indice de santé peut également bénéficier à l'évaluation du niveau de dégradations des actifs et des impacts associés (Johnson, Strachan, & Ault, 2012b).

En ce sens, spécifiquement pour les réseaux électriques, da Silva, Melani, Michalski, Souza et Nabeta (2019) utilisent l'AHP pour déterminer les composants critiques d'un

système. Cet article élabore également les critères de comparaison en fonction de la norme ISO 550000. Une seconde publication présente une méthodologie aussi fondée sur la norme ISO-55000 et le processus de l’AHP pour établir la criticité des actifs en tenant compte des interrelations entre les actifs des services publics (Gómez, Fernández, Guillén, & Márquez, 2019). Leur recherche se penche sur la prise de décision multicritère en maintenance et en renouvellement des actifs pour les systèmes complexes des services publics. Les critères sont basés sur les risques pour l’ensemble du réseau, en tenant compte des interrelations. Les résultats de sa recherche démontrent une amélioration de la disponibilité du réseau de 0.73% et une diminution des coûts de maintenance de 10%. Par contre, encore une fois, l’impact des projets d’investissement en gestion des actifs sur d’autres critères que la criticité des actifs n’est pas traité par cet auteur (Gómez et al., 2019). Toutefois, l’utilisation de l’analyse multicritère est limitée pour adresser les enjeux en lien avec les systèmes complexes (Dragan Komljenovic, Georges Abdul-Nour, & Boudreau, 2019).

Les systèmes complexes entraînent un niveau important d’incertitude dans la prise de décision. En ce sens, Cholette et al. (2015) proposent une méthodologie de priorisation des activités interdépendantes de gestion des actifs physiques applicable dans un environnement d’incertitude. Cependant, bien que le modèle indique les critères utilisés dans le cas d’une application spécifique à un service public australien, il ne détaille pas les méthodes utilisées pour évaluer les critères.

Dans le même ordre d’idées, Catrinu et Nordgård (2011) utilisent aussi l’analyse multicritère pour aider la prise de décision en gestion des actifs des réseaux de distribution d’électricité en priorisant les activités de maintenance et de renouvellement des actifs. La méthodologie est développée pour la gestion des risques en présence d’incertitude et des mesures de sécurité. La matrice de risque est utilisée pour cibler les équipements critiques depuis l’analyse de l’état, les probabilités de défaillance ainsi que les conséquences des

défaillances potentielles. Toutefois, le cas étudié repose principalement sur l'avis d'experts et considère uniquement l'évaluation du niveau de risque pour prioriser les actions.

On constate alors que pour adresser cette problématique et permettre d'atténuer l'effet de l'incertitude, la méthode doit reposer sur une analyse de risque (Dezfuli, Stamatelatos, Maggio, Everett, & Youngblood, 2010). En ce sens, il est nécessaire de se doter d'outils ou de méthodologie éprouvée permettant l'évaluation de la criticité des actifs.

Bref, on retrouve certaines publications ayant un objectif similaire à celui de la présente recherche. Les résultats de ces recherches démontrent des gains en fiabilité (Gómez et al., 2019; Soares et al., 2014) et en disponibilité du réseau, ainsi qu'une réduction des coûts relatifs au cycle de vie des actifs (Cahyo, 2017; Gómez et al., 2019). Toutefois, malgré les similitudes, on ne constate qu'aucun de ces auteurs ne propose une méthode complète et détaillée de comparaison des projets d'investissement qui tient compte de tous les éléments suivants:

- Toutes les phases du cycle de vie de l'actif ;
- Une gamme de critères détaillés, basés sur les objectifs multiples et variés des organisations;
- Un portefeuille d'actifs de plusieurs catégories;
- Les systèmes complexes et l'incertitude associée.
- La Figure 1 présente la synthèse de la revue de littérature et met l'accent (en vert) sur les éléments qui seront abordés par la présente recherche.

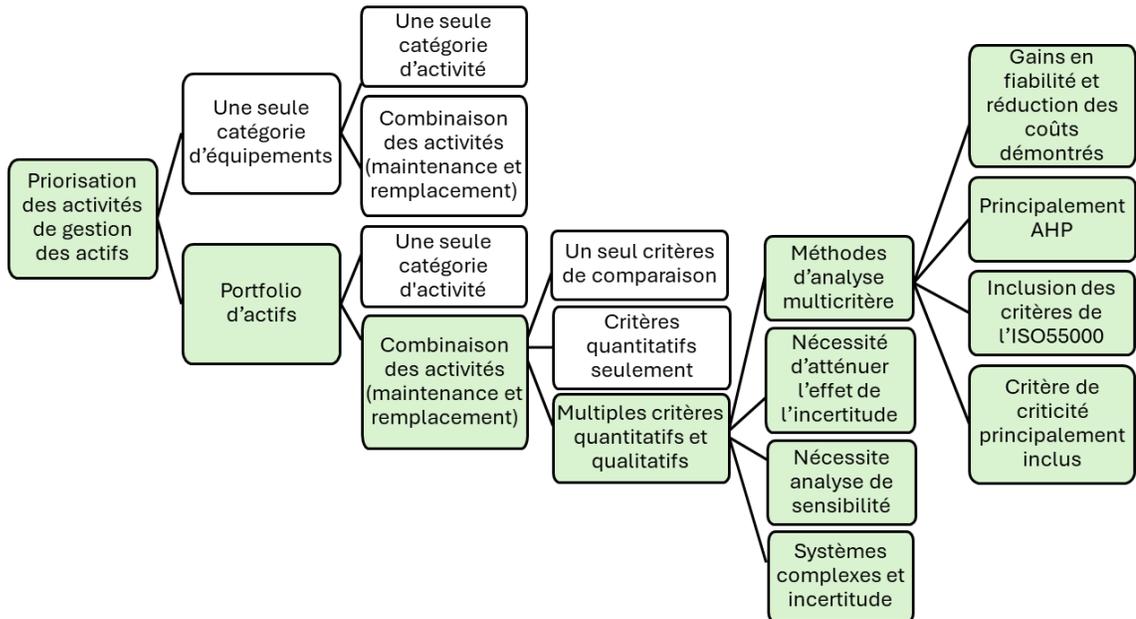


Figure 1 Synthèse de la revue de littérature pour la priorisation des activités de gestion des actifs

Les multiples outils et technologies de l'industrie 4.0 ne sont pas non plus abordés fréquemment par les auteurs. Ainsi, la présente recherche vise à combler ces lacunes de la littérature.

CHAPITRE - 3. LA GESTION DES ACTIFS

La gestion des actifs est un thème qui gagne en popularité depuis les dernières années. Des organisations internationales encadrent et structurent les activités relatives à ce sujet.

3.1. Normes et organisations

L'*Institute of Asset Management*, en partenariat avec la *British Standard Institute* a rédigé en 2004 une spécification pour la gestion des actifs physiques, la PAS-55 ((Institute, 2008a) et (Institute, 2008b)). Elle a subi une révision en 2008. Cette spécification n'est plus renouvelée, mais elle a inspiré la norme internationale ISO 55000 (ISO, 2014a). L'ISO 55000 encadre la gestion des actifs des organisations de petites et de grandes tailles. Elle adresse tous les types d'actifs, tangibles ou non. Étant donné son large spectre d'application, la mise en place concrète des exigences de la norme dans un secteur particulier doit être encadrée plus spécifiquement.

L'*Institute of Public Works Engineering Australasia* a pour sa part rédigé l'*International Infrastructure Management Manual (IIMM)* (IPWEA, 2015). Comparativement à la norme ISO-55000, qui détaille les éléments à introduire dans un système de gestion d'actifs, principalement au niveau de la gestion de l'information, IIMM propose quant à lui les étapes clés à mettre en œuvre pour intégrer les éléments de la norme ISO-55000 dans la gestion des actifs d'infrastructure. Ce modèle est celui qui cadre le mieux au contexte de la présente recherche.

3.2. Définitions

La norme internationale ISO 55000 définit la gestion des actifs comme « l'ensemble des activités coordonnées d'une organisation pour réaliser de la valeur à partir d'actifs » (ISO, 2014a). Cependant, étant donné la large portée de la gestion des actifs, plusieurs organisations ont établi leur propre définition. Il est donc difficile de fournir une explication claire du concept (Wijnia, 2009).

S. A. Khaliq (Khaliq et al., 2015) apporte une définition de la gestion des actifs pour les entreprises d'électricité. Il décrit le concept comme « une procédure organisée d'exploitation, de maintenance et d'amélioration d'actifs électriques en utilisant des pratiques d'ingénierie combinées et une analyse économique ainsi que des pratiques commerciales approfondies ».

Pour obtenir une définition précise, qui tend vers une définition universelle, on doit d'abord distinguer la gestion des actifs physiques de la gestion des actifs d'autres types, tels que les actifs financiers. Y. C. Wijnia (Wijnia, 2009) précise cette différence en signifiant que certains réseaux d'experts utilisent le terme « Engineering asset management », pour différencier la gestion des actifs de type *infrastructures*. Ce terme regroupe l'ensemble des actifs physiques, c'est-à-dire les équipements, terrains, bâtiments, logiciels, véhicules, inventaires, pièces de rechange, etc., mais excluent les marques, licences et brevets de la portée (J. Amadi-Echendu et al., 2010).

3.3. La gestion des actifs physiques

L'ISO 55000 (ISO, 2014a) stipule que « Les actifs physiques désignent habituellement les équipements, les stocks de pièces et les biens détenus par l'organisation ». On reconnaît donc les *infrastructures* comme des actifs *physiques* pour une organisation.

Toutefois, la définition à laquelle on réfère majoritairement est celle encadrée par la spécification PAS-55, soit les « activités et pratiques systématiques et coordonnées par lesquelles une organisation gère de manière optimale et durable ses actifs et ses systèmes d'actifs, leurs performances, risques et dépenses associés tout au long de leur cycle de vie afin de réaliser son plan stratégique organisationnel » (Institute, 2008a). Cependant, on retrouve encore plusieurs définitions distinctes de ce concept à travers le monde (Heck, 2008).

À partir de cette section, le terme « gestion des actifs » utilisé dans le présent document fait référence à la gestion des actifs physiques. En circonscrivant la littérature au domaine

de la gestion des actifs physiques uniquement, on constate aussi que les chercheurs utilisent différents termes pour définir des concepts similaires. La terminologie varie selon le domaine d'application, la région ou le secteur d'activité (Petchrompo & Parlikad, 2019).

S. Petchrompo a rédigé une revue de littérature sur les modèles et méthodes utilisées en gestion des actifs pour les systèmes comprenant plusieurs équipements (Petchrompo & Parlikad, 2019). Il s'est aussi penché sur les différents termes utilisés pour les systèmes regroupant plusieurs équipements ou composants, dans l'objectif d'établir une terminologie commune. Son concept est illustré dans la Figure 2. Ces définitions sont en ligne avec les définitions proposées par la norme ISO-55000 (ISO, 2014a).

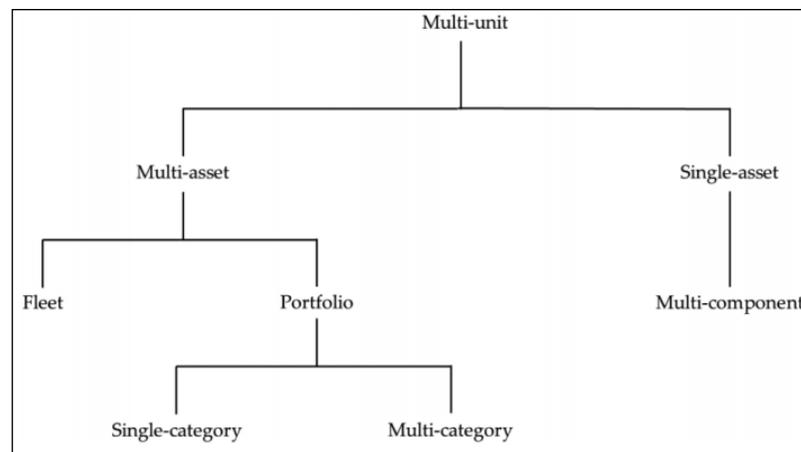


Figure 2 Classification des systèmes formés de plusieurs équipements (Petchrompo & Parlikad, 2019)

Il définit donc le terme « *Multi-unit system* » comme « un système composé de plusieurs actifs qui partagent des caractéristiques ou des ressources communes, sous le contrôle d'une organisation ou un système d'un seul actif composé de plusieurs composants qui fonctionnent ensemble » (Petchrompo & Parlikad, 2019).

Les systèmes d'actifs des entreprises de production, de transport et de distribution d'électricité se situent dans la branche « multi-actifs » de la Figure 2. Cette branche cible

les organisations pour lesquelles on retrouve plusieurs actifs, composés de plusieurs composants. Ensuite, selon la diversité des actifs et la stratégie de maintenance ou de remplacement utilisée, ils sont regroupés en portfolio ou en parcs. Les actifs des portfolios ont des stratégies de maintenance ou de remplacement différentes, mais partagent les mêmes ressources.

3.4. Modèles de gestion des actifs existants

Dans l'objectif de permettre aux organisations de pallier les enjeux contextuels définis au chapitre 1, les éléments essentiels au succès du modèle de gestion des actifs doivent être identifiés.

Les principaux modèles proposés dans la littérature pour implanter une gestion des actifs efficace dans les organisations sont inspirés de celui de la PAS-55 et de l'ISO-55000. En fonction des besoins et des particularités des organisations, chacune définit ensuite son propre modèle de gestion des actifs.

Des auteurs, tels que Shahid, Mahamood et Das (2016), ainsi que Heck (2008), ont comparé les éléments des modèles de gestion des actifs selon certains critères, soit le pays de l'organisation (Heck, 2008), ou le regroupement d'experts (Shah et al., 2016; Shahid et al., 2016). G. J. Van Heck (Heck, 2008) présente les éléments essentiels d'une gestion des actifs efficace. Selon lui, parmi les principes fondamentaux pour implanter une gestion des actifs efficace, on retrouve notamment la collecte et le traitement des données opérationnelles sur les actifs. Ces données doivent permettre de réaliser des analyses pour aider les prises de décisions en matière de gestion des actifs. Par ailleurs, la gestion des actifs doit être une partie intégrante de l'organisation. Les objectifs de gestion des actifs doivent être en lien avec les objectifs globaux de l'organisation (Heck, 2008). Ces éléments doivent donc inspirer la base du modèle de gestion des actifs.

Dans le contexte de la présente recherche, les modèles ont été sélectionnés selon leur niveau de détails, ainsi que la pertinence du secteur d'application par rapport à celui des

entreprises d'électricité. Ainsi, huit modèles utilisés ont été comparés. L'Annexe A présente le détail de l'analyse et des modèles observés.

Ainsi, mis à part les différents niveaux d'adhérence au modèle recommandé par la PAS-55, les modèles analysés présentent plusieurs autres points communs dont :

- L'intégration de la gestion des actifs au cœur de l'organisation.
- La classification des niveaux de décisions et d'actions
- La prise de décision en gestion des actifs basée sur le risque
- La gestion des informations

3.4.1. L'intégration de la gestion des actifs au cœur de l'organisation

Un élément essentiel du succès des modèles de gestion des actifs est l'intégration de ce concept au cœur des décisions de l'organisation (Heck, 2008). L'ensemble des structures évaluées ont appliqué ce principe.

La vision corporative, ainsi que les objectifs d'entreprise doivent être alignés aux objectifs et plans de gestion des actifs. Les objectifs corporatifs peuvent inclure plusieurs critères distincts. Ces critères peuvent également avoir des unités de comparaison différentes, par exemple la santé et la sécurité, ainsi que le maintien de la fiabilité, la productivité, etc.

Parallèlement, les plans de gestion des actifs doivent être rédigés de manière à contribuer aux objectifs corporatifs. Les interrelations entre la vision corporative et les objectifs de gestion des actifs sont illustrés dans la Figure 3.

Un des éléments clés est la révision de la performance du modèle et de la stratégie selon une périodicité préétablie. Cette périodicité doit être suffisamment courte pour maintenir un rythme idéal au progrès de l'organisation, mais aussi pour permettre une révision rapide en cas de décalage par rapport à la performance attendue. En revanche, cette périodicité doit aussi être suffisamment longue pour conserver l'adhérence de l'ensemble de l'organisation au modèle.

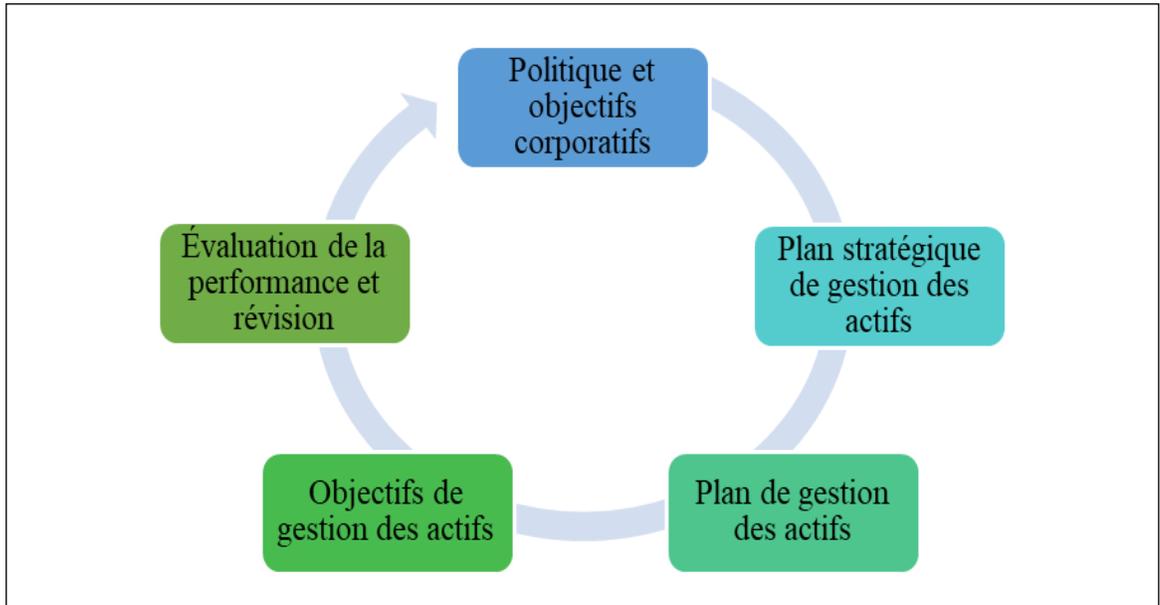


Figure 3 Interrelations de la vision corporative et des objectifs de gestion des actifs

3.4.2. *Classification des niveaux de décision et d'actions*

Dans plusieurs modèles de gestion des actifs pour les services publics ou électriques (EPRI, 2006b; Khaliq et al., 2015; Leeuwen, 2011), on distingue des niveaux de décisions et d'actions. La Figure 4 en présente un résumé et des exemples par niveau décisionnel.

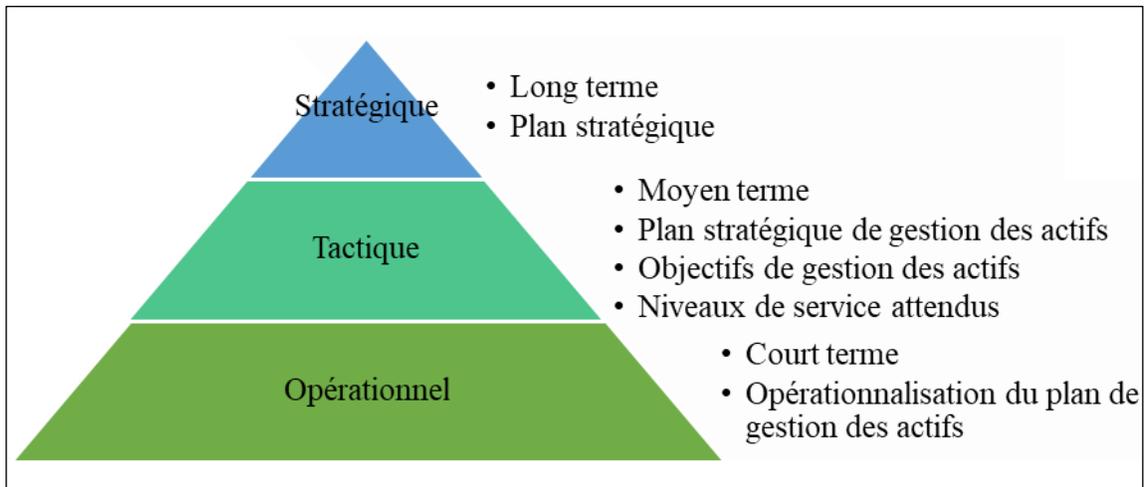


Figure 4 Hiérarchie des actions et des décisions dans les modèles de gestion des actifs

Tel que précisé précédemment, les objectifs stratégiques de l'entreprise et de la gestion des actifs doivent être liés. Ensuite, les décisions et, de ce fait, la priorisation des investissements doivent être liées à ces objectifs. Les objectifs et décisions doivent alors être précisés distinctement selon le niveau décisionnel. En lien avec la section précédente, la fréquence de révision varie aussi selon le niveau de classification des décisions et des actions. Ainsi, le plan stratégique de gestion des actifs défini au niveau supérieur de la pyramide (voir Figure 4) est soumis à des révisions moins fréquentes que le plan de gestion des actifs définit au niveau tactique.

En lien avec l'optimisation des stratégies et les plans de gestion des actifs, on retrouve plusieurs types de décisions à prendre (Dragan Komljenovic et al., 2019; IAM, 2015). La British Standards Institute, via la PAS55 (Institute, 2008b) a déterminé les éléments du cycle de vie des actifs. Ensuite, ces types de décisions peuvent être associées à chaque phase du cycle. Les types de décision en fonction des phases du cycle de vie des actifs sont présentés dans le Tableau 1. À noter que cette liste n'est pas exhaustive, mais cible les décisions incluses dans la portée de la recherche.

Tableau 1 Types de décision en fonction des phases du cycle de vie des actifs

Phase du cycle de vie	Type de décision
Acquisition	Stratégie de réponse à la demande Stratégie d'approvisionnement
Utilisation ou exploitation	Stratégie d'exploitation et d'opération des actifs
Maintien	Stratégie de maintenance
Renouvellement ou élimination	Stratégie de remplacement en fin de vie

3.4.3. *Prise de décision en gestion des actifs en tenant compte des risques*

Essentiellement, un des défis de la gestion des actifs est de trouver l'équilibre entre les performances attendues, les ressources financières et matérielles et les risques (Hussin, Al-Mehairi, & Al-Madhani, 2016; Wheeldon & Hayes, 2012). La prise de décision fondée sur l'analyse des risques permet alors de démontrer la répartition optimale des ressources limitées (Wheeldon & Hayes, 2012).

Ainsi, l'établissement de la tolérance au risque est un élément crucial pour optimiser l'allocation de ressources dans les activités de gestion des actifs en fonction de l'appétit au risque de l'organisation et des niveaux de performance souhaités. Cependant, établir ces niveaux de tolérance représente un défi et doivent être entérinés à un niveau élevé dans l'organisation.

En ce sens, plusieurs recherches visent l'optimisation de certaines activités reliées au cycle de vie des actifs, en intégrant la notion de risque. Avec ces recherches, on peut démontrer des gains en fiabilité (Gómez et al., 2019; Soares et al., 2014) et en disponibilité du réseau, ainsi qu'une réduction des coûts relatifs au cycle de vie (Cahyo, 2017; Gómez et al., 2019). Il est aussi démontré que l'intégration d'un modèle de maintenance basé sur les risques peut réduire le risque global du système de transport d'électricité, par exemple, avec un niveau d'investissement équivalent (Fleckenstein & Balzer, 2014).

Toutefois, la notion de risque doit être comprise dans chaque phase du cycle de vie des actifs (acquisition, opération, maintenance, disposition) afin d'atteindre un rendement maximal sans affecter négativement le niveau de risque (Shah et al., 2016). Également, on constate que les méthodes facilitant la prise de décision pour l'optimisation des investissements sont souvent basées sur les clients critiques ou des équipements critiques. Pourtant, cela nécessite une analyse et une gestion complètes des risques pour s'assurer que le risque lié aux clients ou aux actifs moins critiques n'augmente pas de manière significative.

Dans le contexte de la gestion des actifs pour les systèmes complexes, les risques systémiques gagnent en importance. Les risques émergents sont également de plus en plus présents. Ce phénomène a entraîné la rédaction de la norme ISO31050 en 2023 (ISO, 2023).

De ce fait, les systèmes complexes entraînent un niveau important d'incertitude dans la prise de décision. La prise de décision en situation d'incertitude nécessite une analyse de risque. (Zio & Pedroni, 2012) En ce sens, l'application de la méthode RIDM (Risk-Informed Decision Making), incluant la modélisation probabiliste de la performance des actifs dans l'analyse de risque peut atténuer l'incertitude (Dezfuli et al., 2010). Il est aussi démontré que l'application de la méthode RIDM permet de supporter la prise de décision en gestion des actifs dans le contexte des réseaux électriques (Gaha et al., 2021).

3.4.4. *Gestion des informations*

La gestion des informations est un élément essentiel à un modèle de gestion des actifs efficace. Cependant, il s'agit d'un défi pour la majorité des organisations. La disponibilité, la quantité ou la qualité de la donnée requise pour les analyses est un enjeu dans plusieurs entreprises.

Les outils et technologies de l'industrie 4.0 peuvent faciliter le traitement d'information et atténuer l'effet de l'incertitude liée aux données dans la prise de décision avec l'utilisation d'algorithmes. En effet, on voit récemment apparaître l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans les modèles de gestion des actifs (Mattioli, Perico, & Robic, 2020). La section suivante définit l'industrie 4.0 et les outils technologiques associés. L'impact et les bénéfices pour la gestion des actifs sont également présentés.

CHAPITRE - 4. INDUSTRIE 4.0 ET LA GESTION DES ACTIFS

L'industrie 4.0 fait référence à la 4^e révolution industrielle qui a débuté après 2010 (Kiran, 2019). Le phénomène a vu le jour à partir de plusieurs initiatives technologiques qui ont mené l'Allemagne à prévoir cette révolution (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).

Dans la littérature, l'industrie 4.0 est un sujet d'actualité dont la popularité depuis la dernière décennie est sans contredit. En revanche, on y retrouve aussi beaucoup de confusion par rapport à sa définition, son cadre et aux technologies sous-jacentes.

4.1. Définitions

Malgré des efforts pour déterminer une définition de l'industrie 4.0 (Erboz, 2017), à ce jour, il n'existe pas de définition unanime (Hofmann & Rüsç, 2017; Kiran, 2019 ; Lu, 2017; Nakayama, de Mesquita Spínola, & Silva, 2020). Dans la plupart des publications, on retrouve une définition de l'industrie 4.0 depuis une liste de technologies qui lui sont relatives. Une définition claire est moins souvent présentée (Erboz, 2017; Yilmaz, 2020). Néanmoins, l'un des auteurs, E. Hofmann (Hofmann & Rüsç, 2017) définit l'Industrie 4.0 comme suit :

- « Les produits et services sont connectés via internet ou d'autres applications réseau [...] (connectivité et informatisation cohérentes).
- La connectivité numérique permet une production automatisée et auto-optimisée de biens et services, y compris la livraison sans intervention humaine (systèmes de production autoadaptatifs basés sur la transparence et le pouvoir prédictif).
- Les chaînes de valeur sont contrôlées de manière décentralisée tandis que les éléments du système [...] prennent des décisions autonomes [...]. » (Notre traduction)

En d'autres mots, l'industrie 4.0 représente un environnement où les différents constituants d'un système ou d'une organisation collaborent de manière numérique (dos

Santos & Vianna Lordelo, 2019), où les données sont collectées, traitées et analysées de manière autonome (Kiran, 2019). Cette collaboration favorise l'émergence de plusieurs innovations technologiques permettant d'augmenter la capacité, l'efficacité et la flexibilité des systèmes (Kiran, 2019 ; Lu, 2017).

Cela dit, un constituant essentiel de l'industrie 4.0 est le fait que les innovations technologiques qu'elle chapeaute ne se limitent pas à permettre une augmentation de la capacité de production ou de l'efficacité des organisations. Il s'agit d'une révolution du modèle de gestion, par lequel l'analyse des mégadonnées contribue aux prises de décisions de l'organisation (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019). La principale caractéristique de l'industrie 4.0 est le changement de paradigme qu'elle suscite en entraînant les entreprises à migrer d'une gestion centralisée vers une décentralisation de l'organisation (Hermann et al., 2016) . Bref, l'industrie 4.0 révolutionne l'industrie traditionnelle en apportant des changements majeurs autant dans les usines que dans les modèles et processus d'affaires.

4.2. *Structure, concepts et outils*

Plusieurs auteurs (Da Costa, Dos Santos, Schaefer, Baierle, & Nara, 2019; Lu, 2017; Nakayama et al., 2020) ont tenté de structurer le phénomène de l'industrie 4.0 en définissant des catégories de technologies chapeautées par cette vision, ainsi que leurs interrelations. Ces auteurs ont basé leurs résultats sur des revues de littératures provenant de sources différentes et réalisées à des années distinctes.

L'évolution rapide des technologies est un défi pour la structure de l'industrie 4.0 et l'établissement d'une définition claire (Hofmann & Rüsçh, 2017). Par conséquent, les différents éléments mis de l'avant par les auteurs varient.

Nakayama (Nakayama et al., 2020) a développé une structure de l'industrie 4.0 qui représente le parcours de la transition de l'industrie 3.0 vers l'industrie 4.0. Cette structure se démarque par l'identification d'une infrastructure technologique de base, qui permet

ensuite des possibilités technologiques. Cependant, les possibilités technologiques identifiées ne sont pas représentatives de l'ensemble des avantages de l'industrie 4.0.

Lu (Lu, 2017), quant à lui, a développé le modèle de l'interopérabilité des différents outils et propose 5 catégories de recherche pour définir l'industrie 4.0, soit les concepts et les perspectives, les industries basées sur les systèmes cyberphysiques (CPS), l'interopérabilité, les technologies principales et les applications.

Ensuite, alors qu'(Hofmann & Rüsç, 2017) définissent quatre composants de base de l'industrie 4.0 (CPS, l'internet des objets (IdO), l'internet des services, les usines intelligentes), Erboz (Erboz, 2017) en identifie 9 piliers (mégadonnées et leur analyse, robots autonomes, simulation, intégration des systèmes à l'horizontale et à la verticale, l'IdO, nuage informatique, fabrication additive, réalité augmentée, cybersécurité). Ces auteurs définissent l'industrie 4.0 comme l'ensemble des technologies qu'elle chapeaute.

Pour sa part, Lasi (Lasi, Fettke, Kemper, Feld, & Hoffmann, 2014) présentent les sept concepts fondamentaux de l'industrie 4.0 suivants : l'usine intelligente, les CPS, l'organisation autonome, les nouveaux systèmes de développement des produits et services, les nouveaux systèmes de distribution et d'approvisionnement, l'adaptation aux besoins des utilisateurs et la responsabilisation sociale des entreprises.

De son côté, Hermann (Hermann et al., 2016) identifie quatre principes de conception de l'industrie 4.0, soit l'assistance technique virtuelle et physique, les interconnexions, la gestion décentralisée et la transparence de l'information. Ces deux auteurs définissent l'industrie 4.0 en tenant compte autant des technologies qu'elle apporte que des changements au niveau de la gestion des organisations qu'elle entraîne.

Bref, les concepts, possibilités technologiques et outils chapeautés par l'industrie 4.0 sont résumés dans le Tableau 2. Les définitions ont été développées depuis les références qui visent à présenter l'évolution et la définition de l'industrie 4.0 (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019; Erboz, 2017; Hermann et al., 2016; Hofmann & Rüsç, 2017; Lasi et al., 2014).

Tableau 2 Concepts, possibilités technologiques et outils de l'industrie 4.0

Concepts, technologies, outils	Définition
IdO	Permet l'interopérabilité des éléments d'un système ou d'une organisation en fournissant une interaction numérique entre les objets.
CPS	Vise à relier l'environnement physique et virtuel des éléments des organisations, afin de les synchroniser en temps réel.
Mégadonnées	L'élément clé de l'Industrie 4.0. Il représente la quantité astronomique et la variété des données collectées qui les rendent inutilisables à l'état brut. Un traitement approprié, associé à des jonctions pertinentes entre les types de données, conduit à des informations importantes (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019).
Nuage informatique	Supporte les interconnexions entre les logiciels et les données avec des serveurs hébergés sur le Web plutôt que dans des organisations. Il offre des capacités de stockage et de calcul de données supérieures et facilite l'accessibilité aux données et aux logiciels.
Apprentissage automatique	Concept de l'IA, utilisant des algorithmes. Cette notion repose sur le fait que les « machines » apprennent de manière itérative, depuis l'analyse des mégadonnées. Les données cumulées avec le temps permettent d'améliorer les calculs des algorithmes et donc, les performances des résultats.

Concepts, technologies, outils	Définition
Simulation et modélisation	Permet de réaliser des analyses complexes qu'il serait impossible de mettre en œuvre avec les techniques analytiques traditionnelles et de simuler l'effet des décisions.
Jumeau numérique	Il s'agit d'une reproduction numérique des composants ou d'un système. Cette copie virtuelle est conçue pour réagir de la même manière que le ferait l'élément réel.
Réalité augmentée	Technologie qui permet de lier un environnement virtuel à un environnement physique réel, en enrichissant l'environnement réel avec des données et des informations complémentaires.
Usine intelligente	Représente une usine où le système de production est décentralisé et dans laquelle l'ensemble de la chaîne de valeur est effectué de manière autonome.
Fabrication additive	Représente la fabrication de produits à partir d'imprimantes 3D. Les imprimantes 3D fabriquent les biens par juxtaposition de plusieurs couches de matières premières, à partir d'une conception virtuelle du produit final.

4.3. *L'industrie 4.0 dans les activités de gestion des actifs*

Pour la présente recherche, on s'interroge sur les bénéfices que les outils, concepts et technologies de l'Industrie 4.0 apportent à la gestion des actifs et principalement à la prise de décisions. Les sections suivantes détaillent des cas d'application des outils de l'industrie 4.0 au bénéfice de la prise de décision en gestion des actifs en général, puis plus précisément dans le contexte des entreprises qui produisent, transportent et distribuent l'électricité. Les exemples d'application sont tirés de la littérature et ne sont pas une liste exhaustive de l'ensemble des possibilités qu'offrent les outils de l'industrie 4.0.

4.3.1. *Maintenance prédictive*

L'atteinte de la maintenance prédictive est une des applications populaires des technologies de l'industrie 4.0. Ce type de maintenance entraîne des répercussions favorables sur le nombre d'heures d'arrêt des équipements et sur les dépenses qu'occasionnent les bris. Par ailleurs, on note aussi une diminution des risques relatifs aux défaillances d'équipements, car la probabilité d'occurrence est réduite.

Deux auteurs ont étudié l'impact et l'application de l'IdO pour la maintenance prédictive (Goyal, 2020; Zou, Qin, & Ma, 2012). Grâce à l'IdO, les dispositifs intelligents envoient des données qui, une fois analysées, peuvent prédire les activités de maintenance requises, avant que les défaillances ne se produisent. Parallèlement, en cas de bris non détecté préalablement, les informations collectées facilitent l'identification de la raison de la défaillance et à corriger le problème plus rapidement (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019). L'IdO permet donc de transmettre les données d'état des équipements dans le but d'effectuer une surveillance des actifs en temps réel. Cette surveillance aide à établir la probabilité de défaillance ou l'indice de santé.

De son côté, dos Santos (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019) démontre également l'impact de l'IdO sur le service après-vente en intégrant des capteurs intelligents sur les équipements vendus. Cette innovation permet un avantage concurrentiel important.

Puis, pour instaurer adéquatement les dispositifs, Yun (Yun, Junjie, Ji, & Hua, 2017) présente la structure d'une plateforme pertinente pour la surveillance de l'état des équipements d'un réseau de distribution d'électricité. Cette plateforme est basée sur le nuage informatique et l'architecture est orientée sur le service.

La technologie des jumeaux numériques peut aussi être utilisée à des fins d'instauration de maintenance prédictive, en plus de fournir une planification de la production optimisée et une gestion des inventaires optimisée (Lee, Bagheri, & Kao, 2015). Des auteurs utilisent cet outil afin de prévoir les défaillances et calculer la durée de vie résiduelle des équipements en fonction de données prises à des moments clés durant le cycle de vie (Lee et al., 2015)(Lee, Kao, & Yang, 2014). Pour ce faire, l'utilisation de l'IdO permet, entre autres, de communiquer ces données. Finalement, une fois l'ensemble de ces mécanismes instaurés, le jumeau numérique peut aussi permettre l'optimisation de la stratégie de maintenance et de remplacement du système en permettant une analyse de son état en temps réel.

Yan et ses collègues (Yan, Meng, Lu, & Li, 2017) ont tenté d'optimiser la maintenance prédictive par le traitement des mégadonnées hétérogènes. Leur méthodologie jumelle l'utilisation de plusieurs méthodes pour structurer les mégadonnées. Une fois les données structurées, elles sont analysées de manière à identifier les modèles de données qui aident à prévoir les défaillances des équipements. L'analyse des données peut aussi fournir une meilleure optimisation des opérations de maintenance et de production, dans le but d'atteindre une réduction de la consommation d'électricité.

En plus de fournir des prévisions précises, les algorithmes d'apprentissage automatique sont aussi utilisés à des fins de détection et de prévision de défauts sur les réseaux électriques. Plusieurs auteurs notent l'utilisation des outils de l'industrie 4.0 à cet effet et

identifient les algorithmes pertinents ou les méthodologies applicables aux réseaux électriques (Günel & Ekti, 2019; Marlen, Maxim, Ukaegbu, & Nunna, 2019; Moradi, Shahinzadeh, Nafisi, Marzband, & Gharehpetian, 2019; Ramakrishnan & Gaur, 2016; Wei et al., 2020). Parmi ceux-ci, Koziel, Hilber et Ichise (2020) ont observé les algorithmes utilisés dans les réseaux de distribution pour la détection des anomalies, la désagrégation de la charge et la localisation des défauts.

4.3.2. *Évaluation de l'état*

Similairement à l'intégration de la maintenance prédictive, les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent également améliorer la qualité des données nécessaires aux méthodes d'évaluation de l'indice de santé des actifs (Manninen, Kilter, & Landsberg, 2022)(Islam, Lee, & Hettiwatte, 2017). L'intégration de l'IA dans le traitement des mégadonnées est alors bénéfique à ce contexte.

Entre autres, l'indice d'état peut être obtenu à l'aide d'algorithmes, comme l'algorithme K-moyen (Koksal, Ozdemir, & Ata, 2017), ou des algorithmes basés les réseaux de neurones et de logique floue (Khalyasmaa & Dmitriev, 2015), par exemple. Ces méthodes permettent de définir l'état des actifs en fonction des données opérationnelles. Elle nécessite toutefois une compréhension des modes de défaillance et de leurs causes et s'applique à des familles d'équipements individuels, plutôt qu'à un portfolio d'actifs de multiples catégories.

Principalement pour les réseaux électriques, les outils de l'industrie 4.0 aident à augmenter la fiabilité du réseau en améliorant les techniques traditionnelles d'inspection des équipements et des lignes du réseau électrique. Une méthode d'inspection basée sur l'IdO est présentée par Zhichun (Zhichun et al., 2019). Cette méthode permet aussi d'évaluer l'état des actifs et de déterminer une stratégie optimale d'inspection. Également, Johnson, Strachan et Ault (2012a) ont développé un modèle pour la projection des risques basé sur la modélisation de la dégradation des actifs et des impacts sur l'évaluation des risques. Le résultat est traduit en un indice de santé.

4.3.3. *Priorisation des activités de gestion des actifs selon les risques*

Pour faciliter la priorisation des activités de remplacement et de maintenance dans un contexte de ressources limitées, Clements et Mancarella (2018) proposent une hiérarchisation des activités de maintenance. Cette hiérarchisation se base sur une simulation incluant la probabilité de défaillance des équipements et le temps de réparation. L'extrant est un indicateur de priorité pour les activités de maintenance.

En ce qui concerne la contribution des mégadonnées pour la priorisation des activités de gestion des actifs, Koziel, Hilber et Ichise (2019) se sont concentrés sur la contribution des algorithmes d'apprentissage automatique dans les stratégies de gestion des actifs et la fiabilité de l'alimentation électrique.

Également, Hou (Hou, Zhang, Yu, Shi, & Liang, 2016) définit comment appliquer les techniques d'exploration des mégadonnées sur l'analyse de la vulnérabilité des réseaux électriques, en fonction d'un modèle de risque hiérarchique des lignes électriques. Leur modèle intègre des règles de décisions et un calcul de la distribution de la probabilité des défaillances dans un système N-k, en plus de mettre de l'avant la détection des défauts. La connaissance de l'état des actifs contribue à la prise de décision concernant les actions de remplacement et de maintenance (Hamad & Ghunem, 2020).

Implantées différemment, la modélisation et la simulation peuvent aussi bénéficier à la gestion de risque des municipalités, lors d'événements extrêmes. Ces outils, développés sous une plateforme numérique, permettent de récolter les données relatives à l'état des infrastructures fournies par les citoyens et de les analyser. Il est alors possible d'optimiser le rétablissement des infrastructures abîmées par ces événements (Ham & Kim, 2020).

4.3.4. *Projection de la demande*

La projection de la demande aide la prise de décision en gestion des actifs en tenant compte de l'évolution du contexte externe et des attentes futures de la clientèle. Dans les entreprises d'électricités, pour une grande majorité de cas d'application de l'industrie 4.0,

les mégadonnées sont utilisées dans le but de prévoir la demande en électricité. C'est le cas, entre autres, de Babar (Babar et al., 2017), de Marlen (Marlen et al., 2019), de Gunel (Günel & Ekti, 2019) et de Rosato (Rosato et al., 2020), qui, à partir d'algorithmes d'apprentissage automatiques, prévoient la demande en électricité à court terme.

Rashid (Rashid, 2018) et Sanchez (Sanchez & Rivera, 2017) utilisent pour leur part des modèles de prévision par série temporelle pour analyser les profils des clients et les habitudes de consommation. Imani (Imani & Ghassemian, 2018), de son côté, utilise les données obtenues par les compteurs intelligents pour planifier la demande par groupes de consommateurs définis depuis un questionnaire, plutôt que pour l'ensemble de la clientèle.

Dans bien des cas (Cheah, Zhang, Gooi, Yu, & Foo, 2012; Chen & Chiu, 2015; Günel & Ekti, 2019; Luo et al., 2015), l'identification des profils de charge et la prévision de la demande sont effectuées dans le but de définir des politiques tarifaires en fonction des heures de la journée et des périodes de pointe. Par ailleurs, un autre avantage d'une prévision précise de la demande est qu'elle donne la possibilité de planifier optimalement la distribution de la production d'électricité renouvelable et ainsi éviter ou réduire la production de gaz à effet de serre (Moradi et al., 2019; Zareifar, Zartabi, & Ouraei, 2019).

Finalement, dans l'objectif d'intégrer la projection de la demande aux modèles de priorisation des activités de gestion des actifs, Butans et Orlovs (2016) proposent un outil d'optimisation des investissements. L'outil est basé sur la modélisation et la simulation. Le modèle prend en compte l'évolution du parc d'actif en fonction : de l'évolution de la demande, des nouveaux actifs, des innovations futures et des défaillances.

4.3.5. *Prototypage virtuel*

Les outils de simulation et de modélisation facilitent la comparaison de scénarios de prises de décisions en reproduisant les conditions réelles d'exploitations depuis des prototypes virtuels. Ces technologies sont avantageuses pour projeter l'impact des décisions. Elles le sont également pour les entreprises où la création de prototypes physique est onéreuse ou

difficilement réalisable. Les gains en matière première, en main-d'œuvre, ainsi qu'en espace sont importants. Un exemple de cette technologie est présenté par Dos Santos (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019) avec une étude de cas chez l'entreprise Embraer. Cette entreprise œuvre dans le domaine de la production d'avion. Cette technologie est essentielle pour l'entreprise, car il existe de multiples variantes de conception pour les avions. De plus, les conditions d'exploitation des avions sont difficilement répétables en laboratoire. La création de prototypes physique est donc difficilement réalisable et très coûteuse.

Pour les réseaux électriques intelligents, la simulation aide la comparaison de types de configuration, l'influence des algorithmes décisionnels, des critères d'optimisation, etc. La complexité de la simulation réside dans la génération automatique d'un modèle de calcul dynamique basé sur un flux de travail qui évolue en temps réel, entraînant des temps, et donc des coûts, de simulation extraordinaire.

4.4. Contribution de l'industrie 4.0 pour la prise de décision

En observant la littérature actuelle, on constate que les décisions en termes d'investissements sont :

- Aidées par des modèles de simulation, incluant l'utilisation de jumeaux numériques.
- Facilitées par un traitement approprié des mégadonnées (dos Santos & Vianna Lordelo, 2019) et l'IA.
- Doivent considérer une analyse des risques.

Les modèles de simulation fournissent des informations pertinentes pour guider les décisions et la priorisation des investissements en gestion des actifs en intégrant de multiples éléments que les méthodes traditionnelles ne pourraient combiner. Effectivement, la simulation peut permettre d'évaluer l'impact à long terme de la stratégie de maintenance (Suryani, Hendrawan, Faster, & Dewi, 2015).

Toutefois, on constate que la modélisation et la simulation, tout comme le jumeau numérique, doivent être basées, entre autres, sur les données opérationnelles historiques et en temps réel. En effet, la prévision de la dégradation des actifs nécessite une connaissance de l'état des actifs. Un effort de gestion des informations et des données sera alors nécessaire pour compiler et traiter les données pertinentes. Les outils et technologies de l'industrie 4.0 peuvent faciliter ce traitement d'information et d'atténuer l'incertitude dans la prise de décision avec l'utilisation d'algorithmes d'IA.

Par ailleurs, ces outils facilitent également l'évaluation de la fiabilité des actifs. Toutefois, lorsqu'on tente d'établir une hiérarchie des actifs pour un portefeuille de catégories multiples, il faut recourir à des méthodes de modélisation et de simulation applicables aux systèmes complexes pour évaluer la criticité ou la fiabilité des actifs.

En effet, pour les systèmes complexes, les méthodes traditionnelles d'évaluation de la fiabilité sont inadéquates. L'utilisation de méthodes novatrices est nécessaire. Les jumeaux numériques pourraient alors pallier cette complexité (Biard & Abdul-Nour, 2021). Le défi de cette approche est de représenter adéquatement toutes les interrelations entre les actifs et de déterminer un indicateur de performance commun pour tous les actifs, permettant de les comparer avec une mesure uniforme.

4.5. Contribution de l'industrie 4.0 dans la gestion des actifs des entreprises d'électricité

Dans le domaine des entreprises qui produisent, transportent et distribuent de l'électricité, les outils de l'industrie 4.0 peuvent être bénéfiques de plusieurs façons. Dans la littérature, les études se sont concentrées sur les impacts et les avantages d'un seul outil ou d'une technologie particulière de l'industrie 4.0 pour la gestion des actifs des entreprises d'électricité. Les auteurs qui ont inclus plus d'un outil de l'industrie 4.0 dans leur recherche se sont principalement concentrés sur un type particulier d'équipement. C'est le cas de J. E. Amadi-Echendu et Mafutsana (2016), dont la publication porte sur les transformateurs de transport d'électricité.

Depuis la revue de littérature, on constate qu'aucune publication ne résume les bénéfices de l'industrie 4.0 pour la gestion des actifs des réseaux électriques d'un point de vue global. Pour pallier cette lacune, la présente revue inclut 23 articles (Babar et al., 2017; Cheah et al., 2012; Chen & Chiu, 2015; Günel & Ekti, 2019; Hou et al., 2016; Imani & Ghassemian, 2018; Luo et al., 2015; Marlen et al., 2019; Mohsenian-Rad & Leon-Garcia, 2010; Moradi et al., 2019; Paya & Marinescu, 2014; Ramakrishnan & Gaur, 2016; Rashid, 2018; Rivera & Rodriguez-Martinez, 2016; Rosato et al., 2020; Sanchez & Rivera, 2017; Sivapragash, Thilaga, & Kumar, 2012; Wan, Yu, Wu, Li, & Liu, 2019; Wei et al., 2020; Yun et al., 2017; Zareifar et al., 2019; Zhang, Huang, & Bompard, 2018; Zhichun et al., 2019).

Pour résumer l'impact global de l'industrie 4.0 pour la gestion des actifs dans les entreprises qui produisent, transportent et distribuent de l'électricité, les cas d'application présentés dans la littérature ont été comparés aux éléments du modèle de gestion des actifs de l'IIMM (IPWEA, 2015). Le modèle de l'IIMM est basé sur l'ISO-55000. Ce modèle a été sélectionné, car il s'agit de celui qui permet une intégrabilité rapide et qui facilite l'auto-évaluation de la maturité de l'entreprise en termes de gestion des actifs. La Figure 5 illustre les résultats.

Bien que cette analyse ne représente pas la liste exhaustive de tous les avantages, les principaux éléments, ainsi que leurs interrelations sont représentés. L'objectif est de démontrer comment l'application d'un outil pour un domaine d'application spécifique peut influencer l'ensemble du modèle de gestion des actifs.

Une analyse plus détaillée fait l'objet de l'Article « Industry 4.0 Contribution to Asset Management in the Electrical Industry » publié dans le cadre de la présente recherche (Biard & Abdul-Nour, 2021).

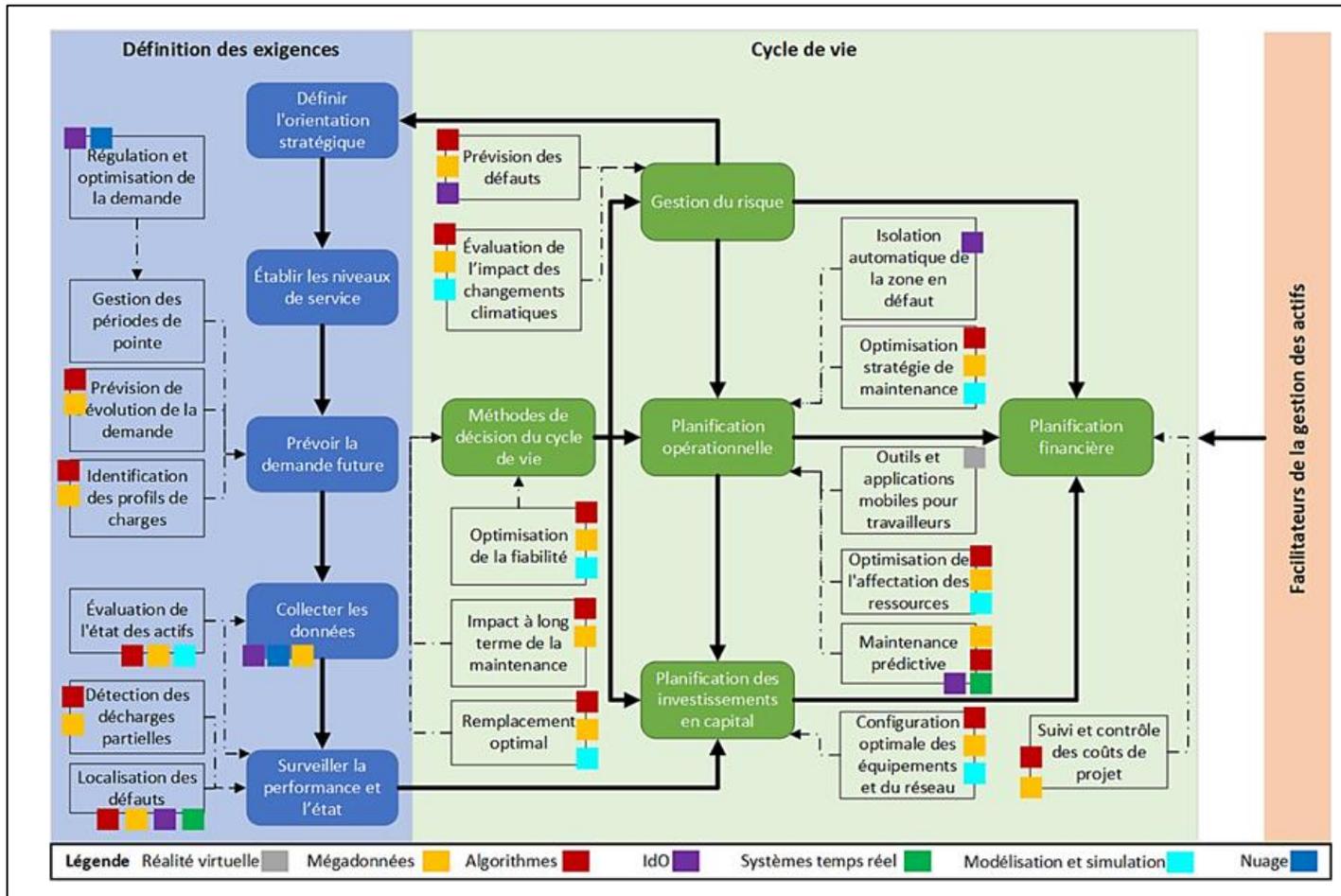


Figure 5 Contributions de l'Industrie 4.0 au modèle de gestion des actifs de l'IIMM pour les entreprises électriques (Modèle adapté de IPWEA (2015))

4.5.1. *Contribution des mégadonnées*

L'apport principal des éléments de l'industrie 4.0 est l'utilisation des mégadonnées. En ce sens, des auteurs se sont penchés sur les méthodes existantes dans la littérature pour structurer et analyser les mégadonnées. Leurs applications potentielles dans les entreprises électriques et les enjeux à considérer font aussi l'objet de plusieurs recherches (Luo et al., 2015; Moradi et al., 2019; Sanchez & Rivera, 2017; Zhang et al., 2018).

Par ailleurs, ces mégadonnées structurées doivent être jumelées à des algorithmes d'IA adéquats pour assurer un traitement approprié. Les modèles d'IA sont développés à partir de données. Plus la base de données est alimentée et de qualité, plus le modèle est efficace et plus intelligent. Ainsi, l'IA et les mégadonnées sont deux éléments qui se renforcent mutuellement. La contribution de l'Industrie 4.0 à la gestion des actifs passera donc sans aucun doute par l'IA.

Dans les réseaux électriques, il existe plusieurs publications relatives aux avantages de l'analyse des mégadonnées sur la gestion des actifs (Angell & Ayers, 2013; Koziel et al., 2019; Moharm, 2019; Stimmel, 2016; Zhou, Fu, & Yang, 2016). En effet, cette méthode permet aux industries électriques de faire face à la complexité liée à la structure du réseau, aux composants, aux contraintes, aux multiples solutions alternatives, ainsi qu'aux incertitudes entourant les prédictions et les risques (Koziel et al., 2019).

Les réseaux électriques et les compteurs intelligents produisent et transmettent des données en quantité astronomique. Les données générées ont les caractéristiques des mégadonnées et donc, laissent place à une multitude de possibilités d'analyses exhaustives et à des informations hautement pertinentes. En effet, une fois structurées convenablement, les mégadonnées forment la base à la mise en place d'outils et de technologies avancées dans les réseaux électriques.

4.5.2. *Contribution de l'internet des objets*

L'IdO est également une des technologies qui permettent des bénéfices notables en gestion des actifs pour les réseaux électriques. En effet, avec la croissance de l'IdO, de plus en plus d'équipements domestiques contiennent des dispositifs électroniques intelligents qui rendent possible leur contrôle à distance.

L'utilisation de ces dispositifs favorise donc la régulation de la consommation en permettant la modulation de la demande en fonction des périodes de la journée et des habitudes de consommation (Cheah et al., 2012)(Chen & Chiu, 2015). L'utilisation de l'IdO sur les réseaux électriques peut également permettre le délestage des charges considérées non critiques, lors de surcharge du réseau, d'interruption de courant ou de défaillance (Ramakrishnan & Gaur, 2016).

4.5.3. *Contribution des jumeaux numériques*

Dans les entreprises du secteur de l'électricité, l'utilisation des jumeaux numériques est peu répandue. D'ailleurs, très peu de publication traite l'utilisation d'un ou de plusieurs jumeaux numériques pour représenter l'ensemble du réseau, incluant la production, le transport et la distribution d'énergie. Les publications sont aussi très récentes, soit datant de 2019 et plus. Parmi les publications, (Liu et al., 2021) et (Pan et al., 2020) démontrent les innovations et les champs d'application des jumeaux numériques dans les entreprises d'électricité. Puis, (Zolin & Ryzhkova, 2020) présentent deux exemples de jumeaux numériques popularisés dans des entreprises du secteur de l'électricité.

Le premier est ELVIS, le jumeau numérique développé par Fingrid pour les réseaux de transport. Le second est développé par le groupe slovaque VSE pour le réseau de distribution. Il est à noter que l'utilisation de jumeaux numériques pour évaluer l'état des équipements dans ce domaine est d'autant plus avantageuse étant donné l'étendue géographique couverte par les actifs. Les inspections fréquentes sont donc irréalistes ou économiquement non justifiables (Gitelman, Kozhevnikov, & Kaplin, 2019).

Ces applications soulignent l'impact des outils de l'industrie 4.0 sur l'ensemble du réseau électrique. L'étendue des possibilités d'application peut même affecter les comportements de consommateurs. Finalement, l'évolution des technologies de l'industrie 4.0 entraînera certainement d'autres transformations pour les entreprises d'énergie et perfectionnera les applications actuelles.

CHAPITRE - 5. MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Dans un modèle de gestion des actifs comprenant des portefeuilles d'actifs de multiples catégories, on reconnaît la nécessité de recourir à des processus spécifiques pour la prise de décision et la priorisation des investissements (Petchrompo & Parlikad, 2019).

Par ailleurs, dans le contexte des systèmes complexes, on reconnaît un niveau important d'incertitude dans la prise de décision (Dezfuli et al., 2010). Les systèmes complexes sont caractérisés par leur comportement non intuitif et une dynamique non linéaire. Un système complexe est défini non seulement par la grande quantité d'éléments qui le composent, mais surtout par leurs interrelations. La performance globale du système reflète donc le résultat difficilement prévisible des interactions entre les éléments qui le constituent, plutôt que la somme des résultats individuels de chaque élément (Mahmood et al., 2019; Seddari, 2015). Les réseaux électriques sont considérés comme de grands systèmes complexes (Mahmood et al., 2019; Xu et al., 2010).

De ce fait et comme déterminé au chapitre 3.4.3, la prise de décisions pour les activités de gestion des actifs dans le contexte des systèmes complexes doit considérer la notion d'incertitude. On reconnaît trois types d'incertitudes (EPRI, 2006a) applicables au contexte de la présente recherche :

- L'incertitude paramétrique : Relatif aux défaillances ou aux événements aléatoires. Pour ces événements, on a la connaissance qu'ils vont se produire et le taux, mais on ne sait pas à quel moment.
- L'incertitude épistémique : Relatif au manque de données de qualité ou de quantité suffisante, aux limitations des méthodes d'analyses ou de modélisation, ainsi qu'au niveau de connaissance des phénomènes étudiés. Pour cette catégorie d'incertitude, les projets de recherches et de développements visent à atténuer son impact et améliorent les niveaux de connaissance, les données et les méthodes.

- L'incertitude d'exhaustivité : Relatif aux limitations de portée et aux éléments inconnus et donc non représentés.

En ce sens, bien que les méthodes de prises de décision multicritères puissent permettre de limiter l'incertitude, elles ne permettent pas d'adresser l'ensemble des enjeux liés aux systèmes complexes (Dragan Komljenovic et al., 2019). Elles permettent également de pallier la limitation d'utilisation de méthodes basées sur le risque, car ces dernières requièrent une connaissance des probabilités ou fréquences d'occurrence des événements redoutés. Comme les données ne sont pas disponibles en quantité et qualité suffisante, les méthodes d'analyse multicritères supportées par un comité d'expert sont adéquates.

Les méthodes d'analyse multicritères peuvent aussi aider à mettre en commun l'ensemble des éléments des objectifs corporatifs et prioriser les projets qui y correspondent le mieux. Également, dans le cadre des portefeuilles d'actifs de multiples catégories, les mesures de performance traditionnelles sont incompatibles pour l'ensemble des systèmes qui les composent. L'analyse multicritère est donc applicable dans ce contexte.

Dans un autre ordre d'idées, les méthodes d'analyse multicritères sont soumises à des sources d'incertitudes qui peuvent avoir des effets notables sur les résultats des analyses. Parmi les incertitudes possibles, en plus des différences liées aux méthodes utilisées, on reconnaît des variations attribuables aux paramètres de choix, c'est-à-dire les seuils ou les pondérations. Afin de comprendre l'effet de l'incertitude, une analyse de sensibilité doit être effectuée (Benani, 2023). Cette analyse de sensibilité est présentée à la section 6.9. Cette évaluation consiste à quantifier la variabilité pour laquelle le résultat peut être sensible au point de faire varier la conclusion finale de la priorisation (EPRI, 2008).

Ainsi, selon les résultats de la revue de littérature et les éléments discutés ci-haut, on constate que la méthode d'analyse multicritère peut permettre de prioriser les projets d'investissement dans le contexte des systèmes complexes et de la présence d'incertitude.

Ensuite, dans le but de valider l'opérationnalisation du cadre méthodologique proposé, la méthode d'étude de cas a été retenue. L'étude de cas porte sur Hydro-Québec (HQ), soit sur une entreprise qui produit, transporte et distribue de l'électricité.

CHAPITRE - 6. CADRE MÉTHODOLOGIQUE PROPOSÉ

La Figure 6 présente l'ensemble de la méthode proposée. Il est à noter que le cadre méthodologique est adaptable en fonction des données disponibles, des objectifs de l'organisation et de l'opinion des décideurs. Il s'agit donc d'un cadre permettant d'intégrer différents modules provenant d'études ou intrants complémentaires. L'objectif de cette conception par module est de permettre une meilleure adaptabilité aux recherches futures. Ainsi, les intrants complémentaires proposés sont influencés par les technologies de l'industrie 4.0. Ces intrants complémentaires bonifient le modèle d'aide à la décision.

Les étapes A, B et C ont été discutées dans le chapitre 5. Les prochaines sections définissent pour leur part le détail de la réalisation des étapes 1 à 9, ainsi que la pertinence de chacune d'entre elles.

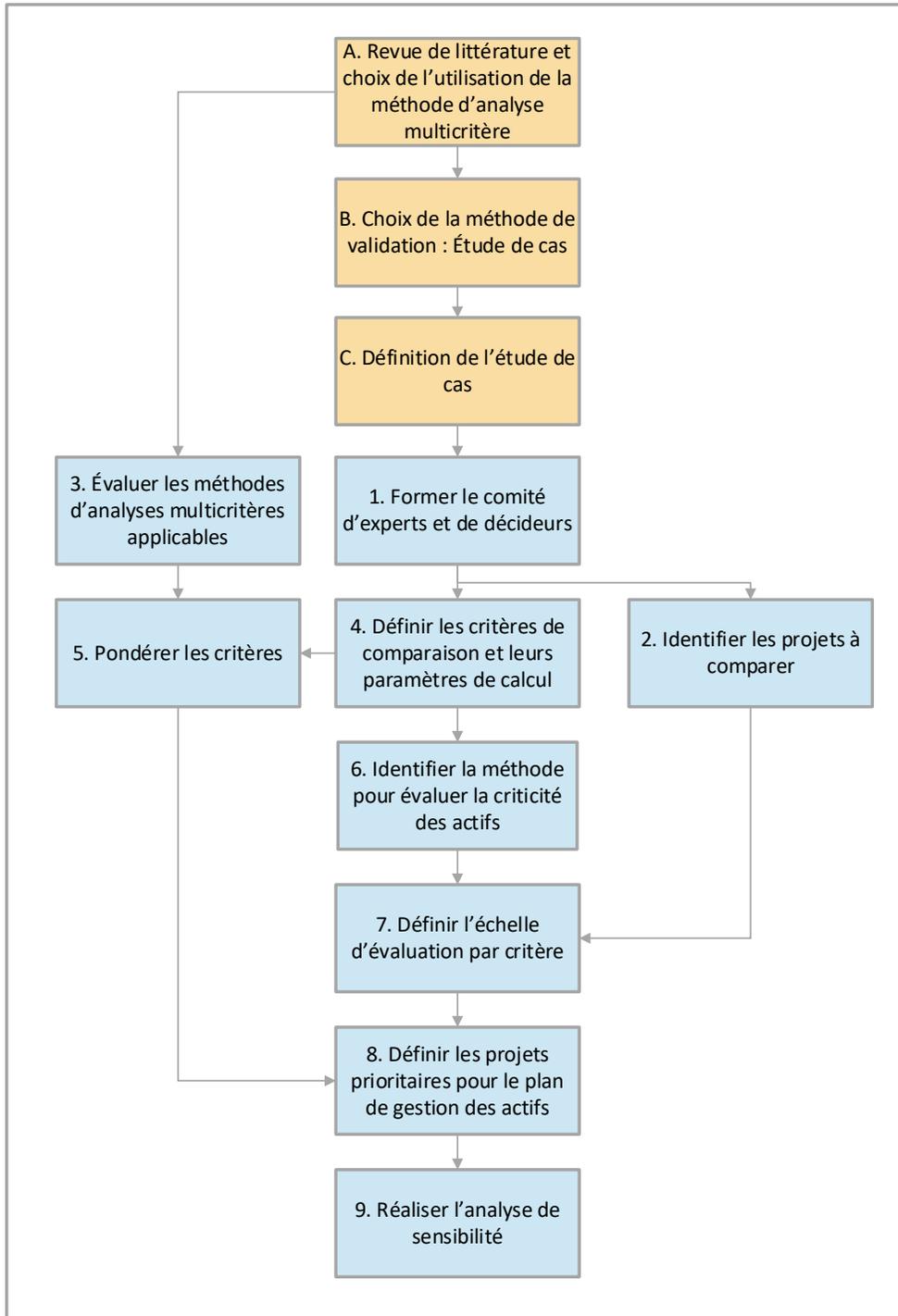


Figure 6 Cadre méthodologique proposé

6.1. *Étape 1 : Former le comité d'expert et de décideurs*

Dans le contexte de la présente recherche, on retrouve un enjeu de données disponibles en quantité et qualité suffisante pour fournir une évaluation précise de chacun des critères. On retrouve également la présence d'un niveau important d'incertitude dans la prise de décision pour les systèmes complexes (Dezfuli et al., 2010). Pour contrer ces deux enjeux, la formation d'un comité d'expert et l'utilisation de la méthode Delphi pour évaluer les critères et les projets peuvent être adéquates.

Le comité doit être formé d'experts reconnus à l'interne de l'entreprise et de décideurs dans le domaine de la gestion des actifs pour l'entreprise à l'étude. Ce comité a le rôle de valider les critères retenus, d'établir les pondérations des critères et d'identifier les caractéristiques des projets d'investissements. Afin d'évaluer les projets d'investissement adéquatement, les membres peuvent consulter d'autres experts en lien avec les éléments techniques des projets.

6.2. *Étape 2 : Identifier les projets à comparer*

Cette étape vise à identifier les activités de gestion des actifs qui doivent être priorisées. Le cadre méthodologique proposé priorise les projets pour les actifs d'un portfolio d'actifs de multiples catégories, dans toutes les phases de leur cycle de vie. Il est donc possible de traiter l'ensemble des activités du cycle de vie des actifs.

Les projets d'investissement identifiés doivent préalablement avoir :

- Une analyse technicoéconomique et une validité confirmée
- Une recommandation d'expert validant leur pertinence

Ces conditions sont requises afin de confirmer que les projets comparés sont déjà validés et que leur pertinence est assurée.

6.3. *Étape 3 : Évaluer les méthodes d'analyse multicritère applicables*

Cette étape permet d'identifier les méthodes les mieux adaptées au contexte de la recherche. L'objectif est d'identifier les méthodes de prise de décision multicritères applicables à la gestion des actifs, principalement dans les utilités publiques et l'industrie électrique.

Pour ce faire, le processus de sélection des publications pertinentes est présenté dans la Figure 7. Ce dernier est basé sur la méthode de la revue systématique de la littérature.

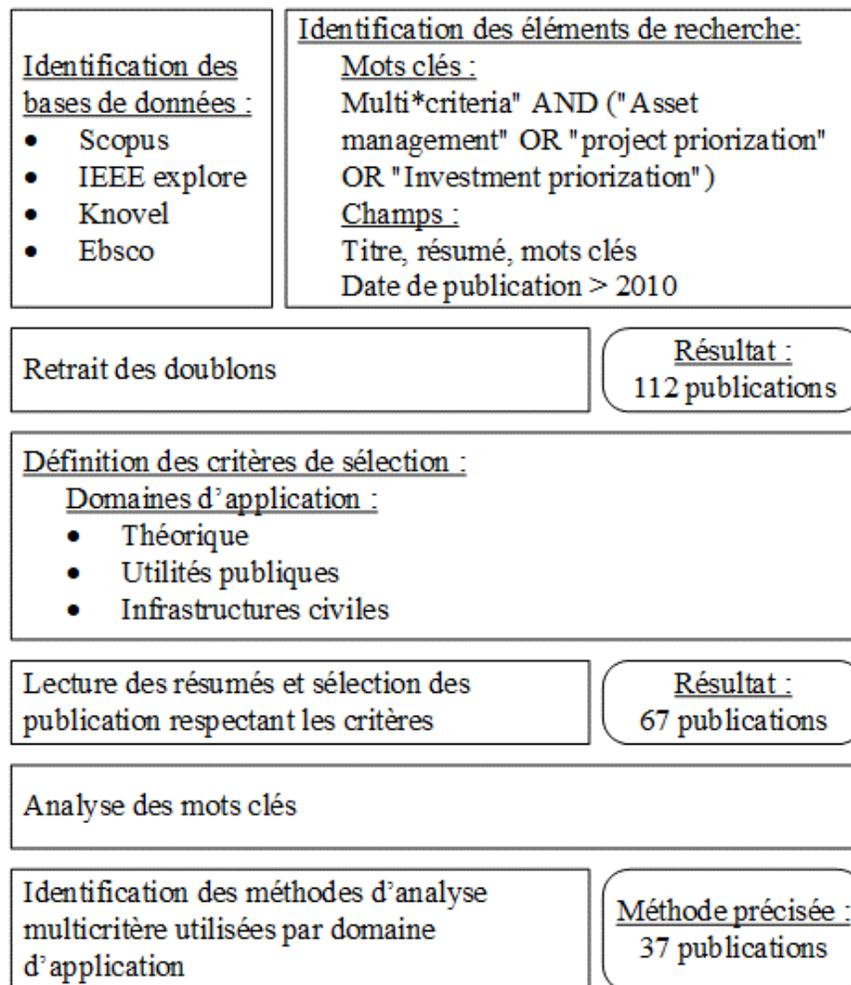


Figure 7. Sélection des publications relatives aux méthodes d'analyses multicritères

La liste des méthodes utilisées dans la littérature, ainsi que leur fréquence d'occurrence est présentée dans le Tableau 3. Ce tableau présente uniquement les méthodes utilisées à plus d'une reprise dans la littérature. La catégorie « autres » représente les techniques se retrouvant à une seule reprise dans l'analyse. Les méthodes non précisées par les auteurs et les processus développés spécifiquement pour le contexte de l'étude sont également inclus dans la catégorie « autres ».

Tableau 3 Répartition de l'utilisation des méthodes de priorisation multicritère

Méthode identifiée	Occurrence	Proportion
<i>AHP et ses variations</i>	12	32%
TOPSIS et ses variations	3	8%
PROMETHEE	2	5%
<i>BWM et ses variations</i>	2	5%
Analyse coûts-bénéfice	6	16%
Somme pondérée	2	5%
Frontière optimale de Pareto	2	5%
Autres	8	22%

À la lecture du Tableau 3, on constate que l’AHP et ses variations sont la méthode la plus utilisée dans la littérature, pour ce contexte précis. En effet, la méthode de l’AHP est largement utilisée depuis son développement par Thomas L. Saaty (Garni, Kassem, Awasthi, Komljenovic, & Al-Haddad, 2016).

Toutefois, afin d’analyser les méthodes les plus adaptées, leur fréquence d’utilisation ne suffit pas. Le Tableau 4 résume brièvement les particularités et inconvénients spécifiques au contexte pour chaque méthode.

Tableau 4 Objectifs, avantages et inconvénients méthodes d’analyse multicritères identifiées dans la littérature

Méthodes	Particularité	Inconvénient principal
AHP	Structurer les décisions complexes et intégrer les perceptions des intervenants selon l’effet sur l’objectif global des critères et alternatives	Laborieuse à réaliser lorsque de multiples projets et/ou critères sont à comparer (Wu & Abdul-Nour, 2020)
TOPSIS	Hiérarchiser les alternatives ayant la distance minimale par rapport à la solution idéale positive et la distance maximale de la solution idéale négative	Les critères doivent être comparés avec une unité commune (Wu, 2020)
PROMETHEE	Comparer les alternatives selon leur niveau de surclassement par rapport aux autres en fonction des préférences	Complexe. Doit être implémentée depuis un logiciel, ce qui affecte la transparence du processus et la compréhension des parties prenantes (Wu, 2020)

Méthodes	Particularité	Inconvénient principal
BWM	Comparer l'importance de l'ensemble des critères et alternatives par rapport au <i>meilleur</i> et au <i>pire</i> critère	Exhaustivité de la méthode affectée par la simplification de l'analyse à deux critères.
Analyse coûts-bénéfices	Comparer économiquement chaque alternative	Les critères doivent être comparés avec une unité commune et monétaire.
Somme pondérée	Comparer les alternatives selon leur incidence sur les critères pondérés	Exhaustivité et précision de la méthode complexe pour l'agrégation de chaque critère et la définition d'une base comparable.
Frontière optimale de Pareto	Définit une frontière de solutions optimales à partir d'une fonction objective à optimiser	Nécessite la combinaison à une autre méthode pour pondérer les critères. La fonction objective nuit à la transparence du processus.

L'un des principaux défis pour l'analyse multicritères est d'établir une agrégation juste de l'importance de chaque critère. De plus, les décideurs et les experts doivent comprendre le processus décisionnel rapidement afin de se l'approprier. Le niveau de complexité des méthodes ne doit pas être un frein à l'élaboration d'une méthodologie de priorisation. (Y. Tlili & Amir Nafi, 2012)

Il est également démontré que la méthode la plus appropriée pour la planification des activités de gestion des actifs dans un contexte de contraintes de ressources et de quantité

ou de qualité de données insuffisante est la méthode la plus simple (Tscheikner-Gratl, Egger, Rauch, & Kleidorfer, 2017).

Par ailleurs, la méthode doit permettre une transparence par rapport aux résultats obtenus. Cette transparence assurera l'adhésion des décideurs et des experts aux résultats de la priorisation. La prise de décision en matière d'investissement doit aussi tenir compte de plusieurs parties prenantes ou de plusieurs décideurs. On doit donc considérer l'avis agrégé de l'ensemble.

Ensuite, la nécessité d'utiliser une unité uniforme peut être un obstacle pour la réalisation de ce type d'analyse. Dans la priorisation des projets d'investissements, on doit tenir compte de l'évaluation de plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs (sécurité, environnement, fiabilité, risque). L'identification d'une unité unique est donc difficilement réalisable.

Ainsi, les méthodes doivent répondre aux conditions suivantes pour être adaptées au contexte de la recherche :

1. Agrégation juste de l'importance de chaque critère
2. Transparence des résultats et du processus
3. Intégration des préférences de multiples décideurs
4. Considération des critères avec des unités diversifiées
5. Compréhension simple pour les décideurs et experts
6. Réalisation rapide avec multiples critères/alternatives

Le Tableau 5 présente l'adhérence ou non aux conditions pour chacune des méthodes utilisées dans la littérature.

Tableau 5 Comparaison des méthodes d'analyse multicritère utilisées

Méthodes	Conditions					
	1	2	3	4	5	6
AHP	X	X	X	X	X	
TOPSIS	X	X	X		X	X
PROMETHEE	X		X	X		
BWM	X	X	X	X	X	X
Analyse coûts-bénéfices		X			X	X
Somme pondérée		X	X	X	X	X
Frontière optimale de Pareto	X			X	X	X

Ainsi, on constate que l'AHP, TOPSIS, la méthode BWM et la méthode de la somme pondérée sont les méthodes les plus adaptées au contexte de la présente recherche.

Toutefois, on reconnaît que la condition 4 est une condition d'exclusion s'il n'est pas atteint par la méthode, car la transformation de l'ensemble des critères en une unité unique n'est pas toujours possible. La méthode TOPSIS est donc exclue. Les trois autres méthodes retenues pour l'analyse sont présentées ci-après.

6.3.1. Méthode AHP

Considérant la popularité de l'AHP, ainsi que les différentes limitations des autres techniques, la méthode AHP est retenue pour la priorisation des projets d'investissements. En effet, l'AHP s'applique dans le contexte d'organisation ayant des « Portfolio d'actifs », comme les entreprises qui produisent, transportent et distribuent l'électricité (Petchrompo

& Parlikad, 2019). L’AHP est aussi retenue comme méthode pour d’autres analyses comparatives de projets dans l’organisation de l’étude de cas pour sa polyvalence et sa performance (Benani, 2023).

Un des avantages de l’AHP est son implémentation simplifiée. Cette simplicité permet une compréhension rapide par les décideurs et les experts, ainsi qu’une transparence par rapport aux résultats obtenus. L’AHP permet aussi d’intégrer les perceptions de plusieurs intervenants par rapport aux critères préétablis et à leur impact sur l’atteinte de l’objectif global. Cette perception est traduite dans une pondération des critères. En utilisant cette méthode, il est aussi possible d’évaluer la cohérence de l’évaluation des critères depuis un indice de cohérence. Cet indice assure une pondération juste des critères en fonction des préférences des décideurs.

Cependant, l’échelle utilisée pour la comparaison par paires nécessaire à la pondération des critères influence le résultat. Le choix de l’échelle applicable doit donc être évalué selon le cas d’application, la pondération des attributs obtenue et les préférences des décideurs (Elliott, 2010; Franek & Kresta, 2014).

Toutefois, l’enjeu relatif à la longueur de la réalisation en présence de multiples alternatives doit être adressé. En effet, dans ce contexte, on peut retrouver un nombre important d’alternatives à comparer. Il est donc nécessaire de pallier la limitation relative au temps de réalisation.

L’AHP peut aussi s’avérer laborieuse si de multiples critères doivent être comparés et d’autant plus laborieuse si de multiples projets sont évalués. Cette lacune doit être adressée pour l’utilisation de cette méthode dans le contexte des portefeuilles d’actifs de multiples catégories. Dans ce contexte, on peut retrouver autant de projets que de catégories d’actifs et de type d’activités. Cet aspect rend alors l’application intégrale de la méthode irréaliste.

Toutefois, il est possible d’adapter la méthode AHP pour contrer cet enjeu. En ce sens, l’AHP peut être appliquée à la pondération des critères uniquement, car elle permet

d'assurer la cohérence de cette évaluation. Ensuite, elle doit être combinée à une autre méthode pour l'évaluation des projets par rapport aux critères pondérés.

La méthode de réalisation de l'AHP pour l'étape de l'évaluation du niveau d'importance (pondération) des critères de comparaison des projets est présentée dans l'Annexe B.

6.3.2. *Méthode BWM*

La méthode BWM se rapproche de l'AHP, mais se base sur la comparaison de l'importance de l'ensemble des critères par rapport au « meilleur » critère et au « pire » critère. Elle représente des bénéfices similaires. Elle a également l'avantage d'être moins laborieuse que l'AHP, car les critères sont comparés par rapport à deux critères uniquement. Cependant, on note des lacunes dans le calcul de l'indice de cohérence (Liang & Brunelli, 2019).

La limitation à la comparaison à deux critères permet également des gains de temps en termes de pondération des critères, mais cela peut aussi nuire à l'exhaustivité des résultats.

En ce qui concerne le volet de comparaison des projets en fonction des critères, malgré les gains de temps, elle demeure, au même titre que l'AHP, trop laborieuse en présence de multiples projets. De ce fait, elle doit également être combinée à une autre méthode pour l'évaluation des projets par rapport aux critères pondérés. Les étapes de réalisation de la méthode BWM pour la pondération des critères de comparaison des projets sont présentées dans l'Annexe C.

6.3.3. *Méthode de la somme pondérée*

En ce qui a trait à la méthode de la somme pondérée, elle se distingue par son niveau de simplicité. Toutefois, elle ne permet pas d'assurer une agrégation juste de l'importance de chaque critère. Une méthode plus élaborée doit permettre la comparaison.

On reconnaît que la méthode de la somme pondérée permet de combler la lacune relative à la difficulté de réalisation de la méthode AHP et de la méthode BWM en cas de multiples

projets. Parallèlement, la méthode de l'AHP et la méthode BWM permettent d'offrir un niveau d'exhaustivité rehaussé pour l'agrégation de l'importance de chaque critère. Une combinaison de ces deux méthodes respectivement avec celles de la somme pondérée permet alors de couvrir l'ensemble des 6 critères.

En ce sens, chaque projet sera évalué sur une échelle ordinale de 5 niveaux pour chaque critère, tel que proposé par Chitpong, Suwanasri et Suwanasri (2016); Güngör-Demirci, Lee, Keck, Harrison et Bates (2019); Masukume, Mhlanga et Mubvirwi (2020).

La recherche effectuera donc l'analyse de l'efficacité de la méthode BWM et de la méthode AHP, toutes deux combinées séparément à la méthode de la somme pondérée pour la priorisation des projets d'investissements

6.4. *Étape 4 : Définir les critères et leurs paramètres de calcul*

La première étape pour appliquer les méthodes d'analyse multicritères retenues consiste à fractionner l'objectif global des organisations en de multiples critères. Ainsi, les critères généralement utilisés pour comparer les projets d'investissements dans le contexte de la gestion des actifs dans la littérature doivent donc être évalués. Ensuite, les critères propres à l'organisation doivent être observés et comparés à ceux de la littérature pour identifier les critères retenus.

6.4.1. *Critères utilisés dans la littérature*

L'évaluation depuis la revue de littérature est nécessaire afin d'améliorer la subjectivité de la prise de décision et d'assurer un positionnement comparable aux autres acteurs du secteur. Le processus de sélection des publications pertinentes pour l'identification des paramètres de comparaison des projets d'investissement est présenté dans la Figure 8

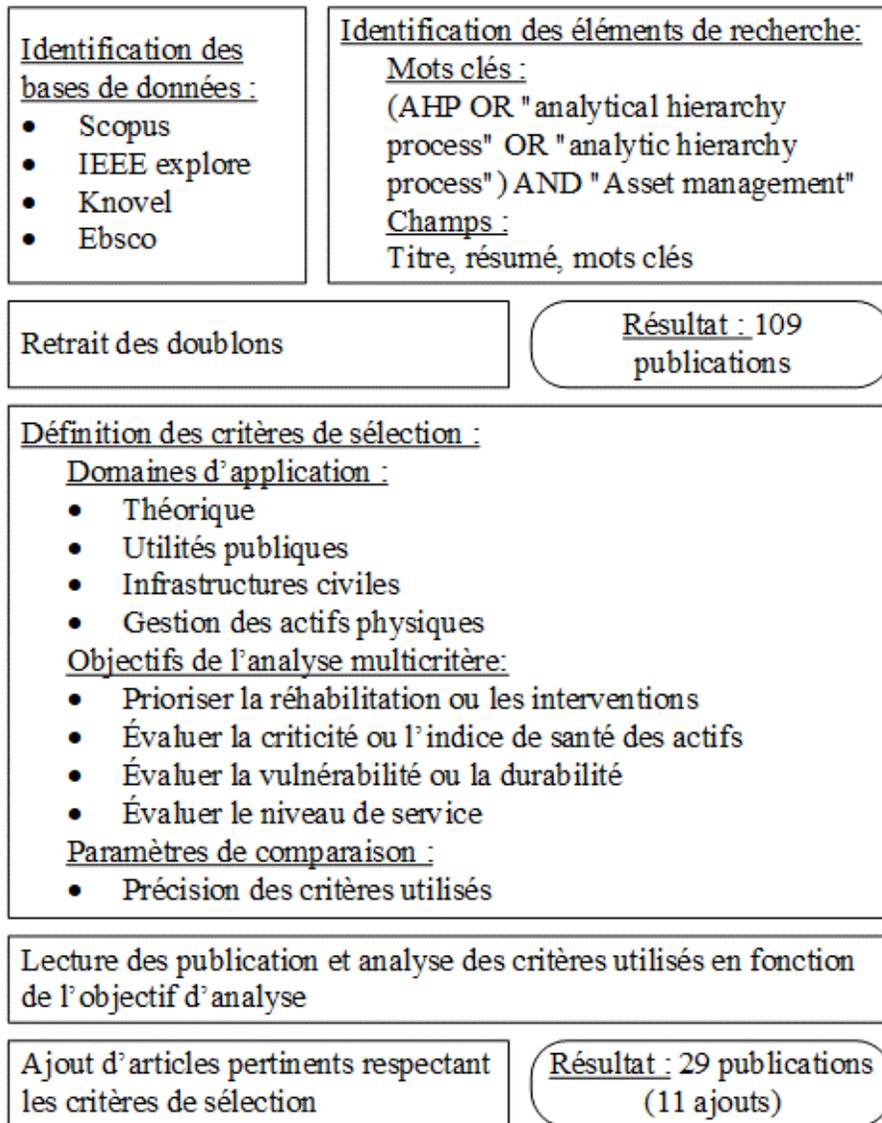


Figure 8. Sélection des publications relatives aux paramètres de comparaison

Dans la littérature, on constate qu'une faible proportion des publications concernent la comparaison multicritère de projets d'investissement précisément. Les publications se concentrent sur l'évaluation de la criticité des actifs, ou le niveau de service atteint par les actifs. Ces publications ont été conservées dans la revue de littérature, car les résultats de l'évaluation de la criticité des actifs, par exemple, sont souvent utilisés comme paramètre de comparaison dans l'analyse multicritère axée sur la priorisation des projets

d'investissement. Les critères de comparaison applicables pour la gestion des actifs sont analysés dans 29 publications pertinentes. 18 de ces publications utilisent l'AHP comme méthode de priorisation.

La Figure 9 présente la répartition de l'utilisation de ces critères regroupés dans les publications dont l'objectif est de prioriser les projets d'investissement en gestion des actifs (13 publications, dont 2 dans le domaine de l'industrie électrique)

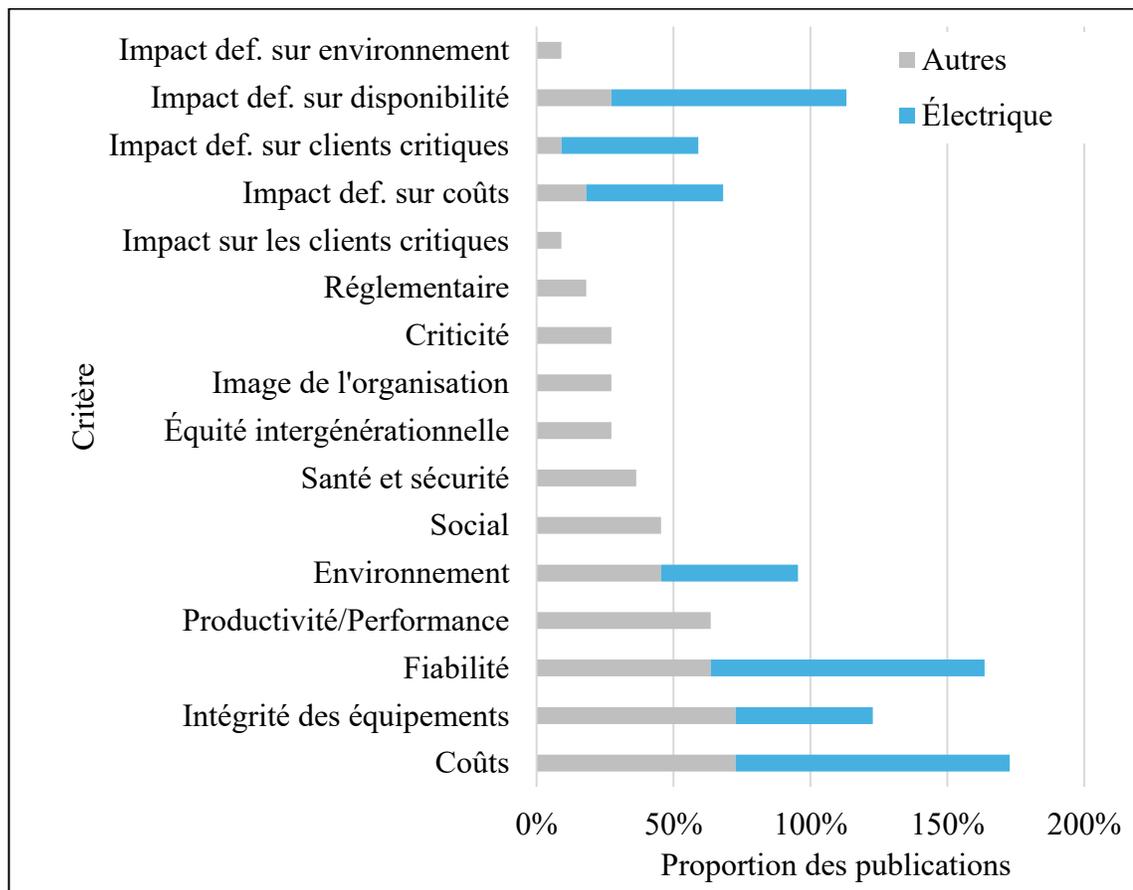


Figure 9 Répartition des paramètres de priorisation des projets d'investissements

Un critère souvent utilisé est la fiabilité des équipements ciblés. Les éléments de fiabilité sont souvent reliés au calcul de la criticité d'un équipement (J. Chitpong et al., 2016; T.

Suwanasri et al., 2014; M. Masukume et al., 2020; M.A. Gharakheili et al., 2018; D. Kifokeris et al., 2018)

L'estimation de la criticité peut être jumelée avec l'évaluation de la fiabilité des équipements. Cette analyse est une étude à part entière. Elle est aussi souvent traitée par l'analyse multicritère. La Figure 9 présente la répartition de l'utilisation de ces critères dans les publications dont l'objectif est d'identifier la criticité des actifs (8 publications (R. dal Silva et al., 2019; J. Chitpong et al., 2016; T. Suwanasri et al., 2014; M. Masukume et al., 2020; M.A. Gharakheili et al., 2018; D. Kifokeris et al., 2018; R. Dehghanian et al., 2012; M. Igroufa et al., 2020), dont 5 dans le domaine de l'industrie électrique)

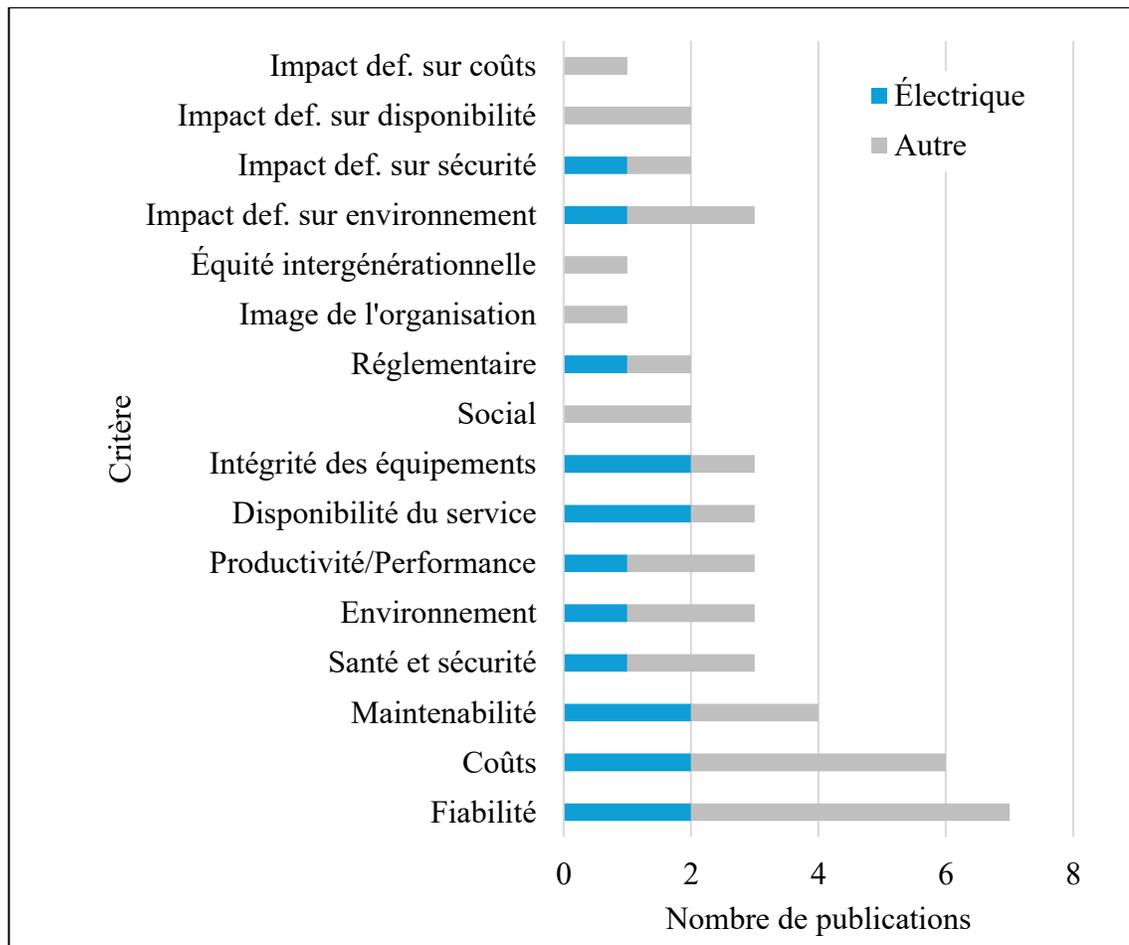


Figure 10 Répartition des paramètres d'évaluation de la criticité des actifs

En fonction des observations de la littérature et en effectuant des regroupements, on reconnaît que les critères suivants devraient être les principaux critères retenus :

- Santé et sécurité
- Environnement
- Criticité et/ou fiabilité, incluant l'impact de la défaillance sur :
 - La santé et la sécurité
 - L'environnement
 - Les coûts
 - La disponibilité du service
- Performance
- Réglementation
- Maintenabilité
- Résilience
- Coûts

Certains critères identifiés dans la littérature n'ont également pas été retenus. C'est le cas, entre autres de la notion d'équité intergénérationnelle. Cette équité fait référence au lissage des dépenses dans le temps et à l'importance de ne pas transmettre de passif d'entretien et d'investissement aux générations futures. L'objectif de la priorisation des investissements afin de pallier le vieillissement des parcs d'actifs vise à adresser cette problématique. L'inclusion de ce critère pourrait mener à un doublon, et ainsi influencer inadéquatement la priorisation des projets.

Également, il peut être considéré que la notion de l'image de l'organisation est assurée par l'atteinte des niveaux suffisants des autres critères. Pour atteindre les niveaux suffisants des autres critères, les ressources disponibles doivent minimalement permettre

d'atteindre des seuils minimaux dans chacun des autres critères. Ainsi, ce respect des seuils minimaux basés vise à préserver l'image de l'entreprise.

Dans un autre ordre d'idée, l'impact sur la santé et sécurité ou sur la diminution du risque relatif à cet enjeu n'est pas un élément ciblé fréquemment dans la littérature. Cela peut s'expliquer par le fait que les investissements requis pour assurer un maintien de la santé et la sécurité ne font pas l'objet d'une priorisation et sont réalisés d'emblée. Toutefois, ce critère est tout de même inclus étant donné son importance. Il vise cependant les projets qui ont pour objectif d'améliorer un élément déjà conforme, mais pouvant voir une réduction des risques. Les éléments ne respectant pas les seuils minimaux ne doivent pas faire l'objet d'une priorisation.

Ensuite, la résilience n'est pas un critère utilisé fréquemment dans la littérature pour la comparaison des projets d'investissements. Cela s'explique par la nouveauté de l'intérêt envers ce concept. En effet, la résilience est encore modestement discutée dans la littérature relative aux services publics d'électricité, mais ce sujet suscite un intérêt croissant. Selon Ciapessoni et al. (2019) « La résilience du système électrique est la capacité de limiter l'étendue, la gravité et la durée de la dégradation du système à la suite d'un événement extrême. »

Quelques auteurs utilisent l'analyse multicritère pour évaluer la vulnérabilité des systèmes et équipements par rapport aux changements climatiques (Gunarathna & Hassan, 2016; Ling et al., 2021; Udie et al., 2018). C'est le cas, entre autres de Karamouz, Movahhed et Elyasi (2022), qui proposent une méthode basée sur l'analyse multi-critère pour évaluer le niveau de résilience par rapport à un événement indésirable spécifique. D'autres auteurs (Michelle S. Dojutrek, 2016) proposent une méthodologie applicable aux infrastructures civiles pour comparer le niveau de sûreté des actifs selon leur vulnérabilité, la gravité et la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable. Considérant les effets potentiels de cet élément sur la fiabilité des réseaux électriques, il s'agit d'un critère non négligeable.

Cet élément permet d'assurer que les investissements ciblés augmentent la résilience des actifs dans un horizon à moyen et long terme.

Pour les critères principaux identifiés, le Tableau 6 détaille les paramètres de calcul associés. Les éléments de calculs sont élaborés de manière à ne pas être considérés dans plusieurs critères de comparaison. Par exemple, l'intégrité de l'équipement est un élément du calcul de la fiabilité et donc, considérée dans l'analyse. Cette unicité est nécessaire pour éviter une surévaluation. Toutefois, selon le cas d'application certains éléments pourraient être transférés d'un critère vers un autre.

Il est à noter que les éléments de calculs présentés ne sont pas une liste exhaustive des éléments possibles, mais simplement des exemples de paramètres utilisés dans la littérature.

Tableau 6 Critères de comparaison et paramètres de calcul principaux

Critère	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Santé et sécurité	L'impact peut être estimé de manière à déterminer l'incidence positive « Faible », « Modéré » ou « Fort » sur la santé et la sécurité (Lucio & Teive, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Risques lors de maintenance et de l'exploitation (da Silva et al., 2019) • Probabilité d'occurrence (Syed & Lawryshyn, 2020) • Niveau d'exposition au risque
Environnement	L'impact peut être estimé de manière à déterminer l'incidence positive « Faible », « Modéré » ou « Fort » sur l'environnement (Lucio & Teive, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Impact futur sur l'environnement • Utilisation des ressources non renouvelables • Nombre de composants • Risques lors de maintenance et d'exploitation • Utilisation de matériaux recyclés • Réutilisation de l'infrastructure • Réduction de l'énergie consommée • Émissions • Pollution sonore ou visuelle (Espie, Ault, & Burt, 2003) • Amélioration de la qualité de l'environnement

Critère	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Réglementaire	Impact du projet sur le niveau de conformité par rapport à la réglementation en vigueur	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau de conformité actuel • Niveau de conformité prévu • Impact de la non-conformité • Engagements légaux, contractuels ou autres
Coûts	<p>Coûts du projet sur l'ensemble du cycle de vie, si possible.</p> <p>Une approximation est possible par coûts médians par interventions (Scholten, Scheidegger, Reichert, Mauer, & Lienert, 2014).</p> <p>Une distinction entre les CAPEX (capital expenditures) et les OPEX (operational expenditures) peut être définie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts du cycle de vie actualisés et annualisés • Coûts de pénalité évités • Coûts d'amortissement • Valeur résiduelle • Revenus potentiels • Coûts actuels sans réalisation du projet

Critère	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Performance	L'impact est estimé à partir de la modification de capacité de l'équipement ou de son importance dans le réseau pour répondre à la demande. Pour ce faire, la charge moyenne peut être comparée à la charge nominale des équipements.	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité • Niveau de réponse à la demande • Taux de surcharge
Maintenabilité	L'obsolescence peut être liée à la maintenabilité. L'obsolescence est un facteur contribuant à la criticité (Morad, Abdellah, & Ahmed, 2013).	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité des pièces de rechange et délai d'approvisionnement (Suwanasri, Phadungthin, & Suwanasri, 2014) (Masukume et al., 2020) • Nombre d'équipement sans pièces de rechange ou sans spécialiste détenant les connaissances suffisantes (Tanaka, Tsukao, Yamashita, Niimura, & Yokoyama, 2010) • Connaissance des experts (Igroupfa, Benzerra, & Seghir, 2020; Suwanasri et al., 2014) • Temps moyen de réparation (da Silva et al., 2019)

Critère	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Résilience	<p>L'évaluation du niveau de résilience doit être effectuée au niveau du système.</p> <p>Il n'y a pas de consensus sur les éléments qui permettent de l'évaluer. Les méthodes de comparaison des investissements affectant la résilience des systèmes ne sont également pas suffisamment développées par les experts, à ce jour.</p> <p>Cependant, il est essentiel d'évaluer le coût du manque de résilience des systèmes électriques pour pouvoir comparer des alternatives en fonction de leur valeur ajoutée (National Academies of Sciences & Medicine, 2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'analyse de la vulnérabilité du ou des actif(s) ciblé(s) • La répercussion du projet sur cette vulnérabilité. • La capacité d'adaptation aux futurs changements climatiques (Ling, Germain, Murphy, & Saroj, 2021; Udie, Bhattacharyya, & Ozawa-Meida, 2018) <p>Malgré l'absence de consensus, le <i>Grid Modernization Laboratory</i> soutenu par le ministère de l'Énergie (National Academies of Sciences and Medicine, 2017) a proposé quelques mesures pour évaluer le niveau de résilience, telles que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La durée cumulée des pannes par les clients, • Le nombre moyen de clients avec des pannes sur une période donnée, • La demande non satisfaite, avec une distinction pour les clients critiques. • Les pannes de courant pour les services critiques • Le temps de récupération, • Les pertes de revenus et les coûts.

Critère	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Fiabilité	<p>Le calcul de la fiabilité projetée doit être priorisé par rapport au calcul du taux de défaillance historique.</p> <p>Dans le cas où la projection de la fiabilité est indisponible, le taux de défaillance historique peut être utilisé.</p> <p>Les éléments de fiabilité sont souvent reliés au calcul du niveau d'intégrité ou de la criticité d'un équipement (Chitpong et al., 2016; Gharakheili, Fotuhi-Firuzabad, & Dehghanian, 2018; Kifokeris, Matos, Xenidis, & Bragança, 2018; Masukume et al., 2020; Suwanasri et al., 2014)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilité de défaillance projetée • Détectabilité de la défaillance (Suwanasri et al., 2014) • Temps moyen de bon fonctionnement • Taux de défaillance par unité de distance ou de temps (Y. Tlili & A. Nafi, 2012), avec agrégation ou non (équipement, système, sous-système, etc.) (Dehghanian, Fotuhi-Firuzabad, Bagheri-Shouraki, & Kazemi, 2012; Lucio & Teive, 2007). • Ratio de dépassement de la vie utile (Han, Hwang, Kim, Baek, & Park, 2015) ou vie résiduelle (Y. Tlili & A. Nafi, 2012) • Indice de continuité de service • SAIDI et/ou SAIFI (Morad et al., 2013; Soares et al., 2014) <p>Ces éléments peuvent affecter la probabilité de défaillance des actifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conception de l'équipement, incluant le nombre d'équipements similaires ayant subi des défaillances dues au design ou à la fabrication (Catrinu & Nordgård, 2011; Marlow, Beale, & Mashford, 2012) • Conditions d'exploitation (Catrinu & Nordgård, 2011; Marlow et al., 2012) • Conformité des entretiens des 6 derniers mois (da Silva et al., 2019) • Nombre de composants avec défauts (Tanaka et al., 2010)

Dans certains cas, la notion de fiabilité peut être incluse dans le critère de criticité. L'évaluation de la criticité des actifs tient compte de la probabilité de défaillance des actifs, soit leur fiabilité et de l'évaluation de l'impact de la défaillance. Le Tableau 7 détaille les critères en lien avec l'impact de la défaillance, ainsi que les éléments d'évaluation principaux. Encore une fois, les éléments de calculs présentés ne sont pas une liste exhaustive, mais simplement des exemples utilisés dans la littérature.

Bien que certains critères soient similaires à ceux identifiés précédemment (santé et sécurité, environnement, coûts), l'évaluation est différente. Pour la criticité, on évalue la répercussion de la défaillance sur ces critères. Dans le cadre de l'évaluation des alternatives, on tient compte de l'incidence du projet sur l'amélioration de ces éléments. L'objectif est de pouvoir comparer un investissement bénéfique pour l'environnement (ex. : remplacement d'une centrale thermique), sans incidence significative sur la fiabilité du réseau, par rapport à un projet qui vient prévenir la défaillance d'un équipement pouvant avoir un effet néfaste sur l'environnement (remplacement d'un équipement avec un taux élevé de fuite de SF₆).

Tableau 7 Critères d'impact de défaillance et éléments d'évaluations associés

Critères d'impact de la défaillance	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Santé et sécurité	Impact potentiel sur la santé ou la sécurité en cas de défaillance. Peut être agrégée par systèmes ou sous-systèmes.	<ul style="list-style-type: none"> • Occurrence des événements indésirables sur un horizon de temps prédéterminé (5 ans, par exemple) (da Silva et al., 2019) • Présence d'un mode de défaillance, ou mode de défaillance principal seulement, ayant un impact sur la santé et la sécurité
Environnement	Impact potentiel sur l'environnement en cas de défaillance Peut être agrégée par systèmes ou sous-systèmes.	<ul style="list-style-type: none"> • Occurrence des événements indésirables associés à l'élément sur un horizon de temps déterminé (5 ans, par exemple) (da Silva et al., 2019) • Présence d'un mode de défaillance, ou mode de défaillance principal seulement, ayant un impact sur l'environnement
Coûts	<p>Impact estimé avec l'évaluation des coûts relatifs au service non fourni et de réparation</p> <p>Il est possible d'utiliser une médiane des données historiques (Scholten et al., 2014). On peut aussi utiliser une agrégation par système (Morad et al. (2013))</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts relatifs au service non fourni (nombre de clients affectés, la consommation moyenne, revenus par kW consommé). • Coûts pour le client (VoLL). • Coûts de réparation de la défaillance • Coûts collatéraux de la défaillance sur d'autres actifs, sur l'environnement, ou autres éléments

Critères d'impact de la défaillance	Détails	Exemples d'éléments d'évaluation
Disponibilité	<p>Impact potentiel de l'actif sur la continuité de service en cas de défaillance</p> <p>Peut être évalué avec ou sans distinction pour les clients critiques. Souvent on utilise une échelle ordinale pour estimer l'incidence sur la clientèle et les clients critiques (Güngör-Demirci et al., 2019; Lucio & Teive, 2007; Morad et al., 2013).</p> <p>Peut être agrégée à plus haut niveau par systèmes ou sous-systèmes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La répercussion sur la disponibilité de l'élément lui-même, d'autres équipements et composants (Suwanasri et al., 2014) • La configuration, présence de contingence (Chitpong et al., 2016) ou de ressources alternatives (Kalutara, Zhang, Setunge, Wakefield, & Mohseni, 2014) • La capacité interrompue (exemple : niveau de voltage (Gharakheili et al., 2018; Rhein et al., 2016)) • Client-heure interrompu (CHI ou CML, Customer Minutes Lost) (Estebaran Peláez, Nieto-Martin, & Butans, 2015) • Nombre de clients interrompus par an (Marlow et al., 2012) • SAIDI, SAIFI, Indice de continuité de service, durée des interruptions (Gharakheili et al., 2018; Kalutara et al., 2014) <p>Pour les réseaux électriques, Morad et al. (2013) proposent cette identification :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Région urbaine avec haute densité (incluant infrastructures critiques) • Région urbaine avec densité moyenne (incluant zones industrielles) • Région rurale avec densité moyenne • Région rurale avec densité faible

6.4.2. Critères utilisés dans l'organisation

Après avoir observé les critères de la littérature, les critères de l'organisation doivent être évalués. Pour ce faire, on doit d'abord traduire les objectifs stratégiques en objectifs de gestion des actifs. En effet, en fonction des éléments identifiés au chapitre 3 comme essentiels dans le modèle de gestion des actifs, il est établi que le modèle de gestion des actifs doit d'abord être intégré au cœur de l'organisation. Cette étape est essentielle pour assurer l'intégration du cadre méthodologique de priorisation des projets de gestion des actifs à l'organisation. Elle est également essentielle pour s'assurer que le cadre proposé correspond aux valeurs, à l'orientation stratégique et à la mission de celle-ci.

Par ailleurs, il est aussi nécessaire d'identifier les critères utilisés pour les activités en lien avec la gestion des actifs telles que :

- Les objectifs de gestion des actifs;
- La stratégie de gestion des actifs;
- La priorisation des projets d'investissement;
- La priorisation des activités de gestion des actifs;
- L'évaluation des risques corporatifs;
- Etc.

Les éléments de calcul des paramètres doivent également être identifiés.

6.4.3. Critères retenus

À cette étape, les critères de comparaison des projets utilisés dans la littérature pour les entreprises de secteurs similaires sont évalués et les critères de comparaison des projets actuellement utilisés dans l'organisation à l'étude sont identifiés.

Ces listes de critères sont combinées et analysées de manière à identifier les critères retenus par le comité d'experts et de décideurs. Au besoin, il est possible de regrouper des critères par thèmes similaires afin d'éviter la redondance ou la surévaluation de certains éléments.

Ainsi, les critères et paramètres d'évaluation de ceux-ci sont :

- Basés sur la revue de littérature
- Définis à partir des objectifs stratégiques de l'organisation
- Basés sur une évaluation détaillée de l'ensemble des critères actuellement utilisés dans l'entreprise à l'étude pour les activités en lien avec la gestion des actifs
- Validés par le comité d'expert

6.5. *Étape 5. Pondérer les critères*

La méthode de priorisation multicritère la plus appropriée au contexte est la méthode AHP pour pondérer les critères. Ensuite, cette méthode est comparée à la méthode BWM. Cette alternative a été identifiée comme l'alternative la plus adéquate après l'AHP pour le contexte de l'étude. Cependant, cette méthode semble être moins sophistiquée pour comparer les avis de plusieurs personnes. Le processus pour réaliser la méthode AHP et la BWM est détaillé dans l'Annexe B et C respectivement.

Tel que précisé au chapitre 6.3.1, on utilise l'AHP et la BWM uniquement pour pondérer les critères de comparaison depuis l'avis de plusieurs décideurs. On utilise alors la matrice de comparaison pour identifier la contribution d'un critère par rapport à un autre pour l'atteinte de l'objectif global.

L'échelle utilisée pour la comparaison est celle définie par l'auteur de la méthode (R. W. Saaty, 1987). Malgré les enjeux liés aux choix de l'échelle, cette dernière demeure l'option privilégiée (Franek & Kresta, 2014). Toutefois, les niveaux intermédiaires ont été retirés, dans le but de permettre des différenciations plus distinctives des pondérations des critères. Le Tableau 8 présente l'échelle détaillée.

Tableau 8 Échelle utilisée pour la comparaison des critères pour AHP et BWM

Échelle	Interprétation	Inverse
1	Importance égale	1
3	Un peu plus important	1/3
5	Plus important	1/5
7	Beaucoup plus important	1/7
9	Incontestablement plus important	1/9

Pour collecter les données relatives aux préférences des décideurs représentés par le comité d'expert, le questionnaire présenté à l'Annexe D a été utilisé. Les résultats de l'évaluation des critères ont été obtenus par la méthode Delphi, mais également par la méthode de la moyenne géométrique.

Dans le cas de la méthode Delphi, le comité d'expert et de décideurs procède d'abord à la comparaison des critères individuellement. Ensuite, les résultats compilés leurs sont présentés dans l'objectif d'obtenir un consensus au terme de plusieurs rencontres. Le consensus est considéré obtenu lorsque l'ensemble du comité est en accord avec les évaluations finales.

En ce qui concerne la moyenne géométrique, les résultats individuels compilés sont utilisés, sans recherche de consensus. Ces deux méthodes peuvent alors fournir des résultats différents. La moyenne géométrique est toutefois la méthode la plus utilisée par les auteurs (Rivest, 2019). On retrouve des exemples d'application avec l'AHP dans plusieurs publications. (Komljenovic, 2008; US Nuclear Regulatory Commission, 2003.

6.6. *Étape 6 : Identifier la méthode pour évaluer la criticité des actifs*

Pour diminuer l'effet de l'incertitude en utilisant la méthode d'analyse multicritère, l'évaluation des alternatives selon les critères doit être basée sur des méthodologies appropriées et rigoureuses (Katina, Pyne, Keating, & Komljenovic, 2021). Selon les observations de la littérature, on constate que les méthodes de prise de décision en gestion des actifs intègrent principalement le critère de fiabilité ou de criticité des actifs. Il est alors nécessaire en premier lieu d'évaluer la méthode la plus adéquate pour l'évaluation de la criticité des actifs.

La criticité vise à témoigner du niveau de risque relatif aux actifs. Le calcul de la criticité peut être établi par agrégation ou individuellement selon les données disponibles ou le niveau de détail désiré. Le critère de criticité combine le paramètre d'évaluation de la *fiabilité* et *des impacts de la défaillance*. Ainsi, afin de réduire l'incertitude liée à l'évaluation de ce paramètre, on cherche d'abord à évaluer les méthodes qui permettent de quantifier la probabilité de défaillance, incluse au calcul de la criticité des actifs.

Afin de déterminer la méthode d'évaluation de la criticité la plus appropriée au contexte, une analyse de la littérature portant sur 85 publications pertinentes a été réalisée. La Figure 11 présente l'analyse combinée du nombre de publications en fonction de leur portée et du type de réseau. Dans ce graphique, les publications qui combinent deux ou trois de ces catégories d'actifs (par exemple, réseau de distribution et de transmission) sont représentées individuellement dans chaque catégorie.

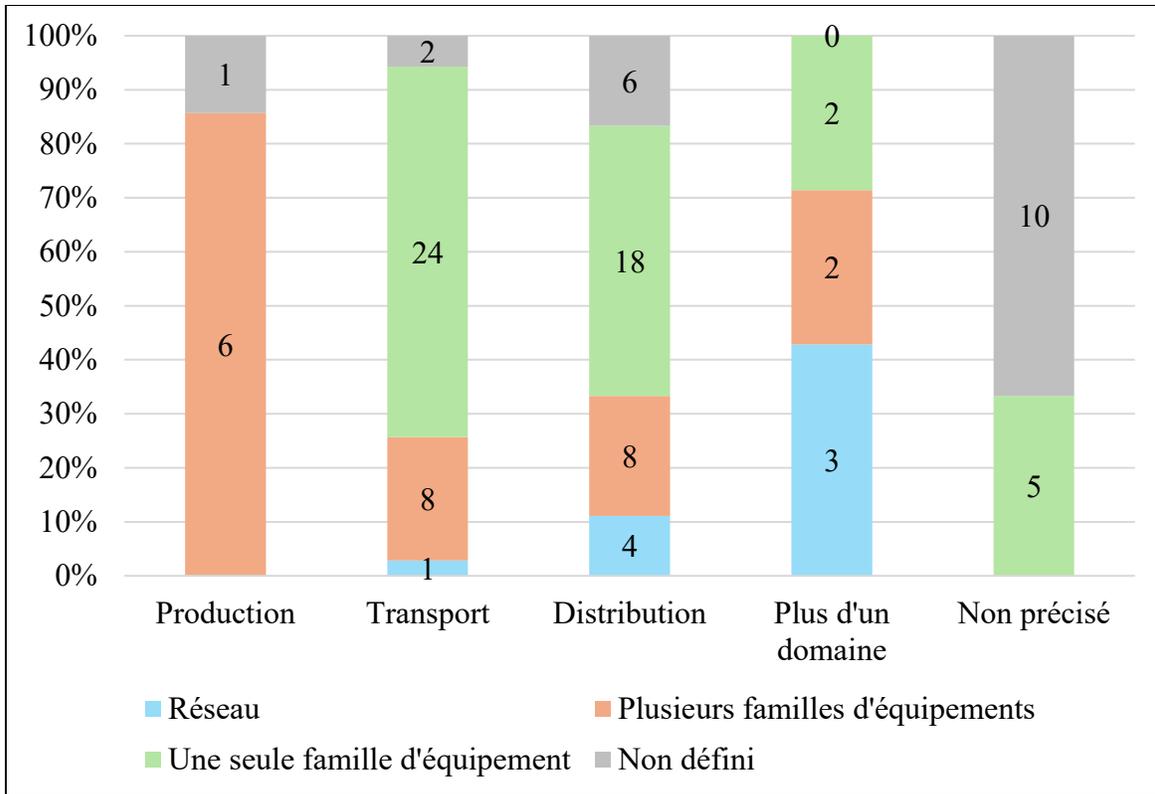


Figure 11 Nombre de publications par portée et type de réseau

On constate que la méthode la plus appropriée pour évaluer la fiabilité ou la criticité d'un actif en vue de prioriser les investissements dans un portefeuille d'actifs dépend de l'étendue de l'analyse et des données disponibles. Ces deux éléments permettent d'identifier l'objectif idéal et réalisable entre : évaluer la criticité des actifs, l'indice de santé ou la probabilité de défaillance.

La Figure 12, la Figure 13 et la Figure 14 présentent la répartition de la fréquence d'utilisation des méthodes pour chaque objectif d'analyse.

Le processus d'identification de la méthode d'évaluation de la criticité des actifs le plus applicable au contexte est ensuite présenté dans la Figure 15.

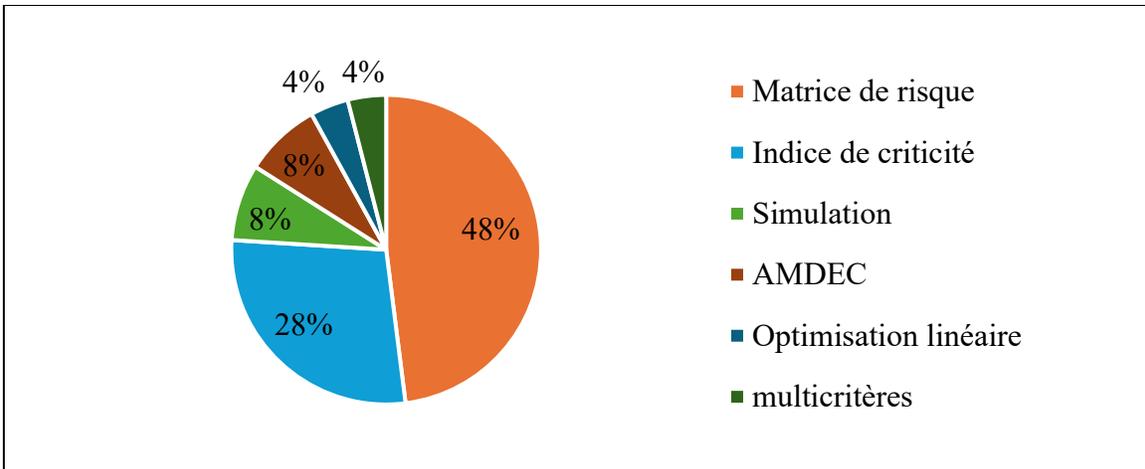


Figure 12 Répartition des méthodes d'évaluation de la criticité

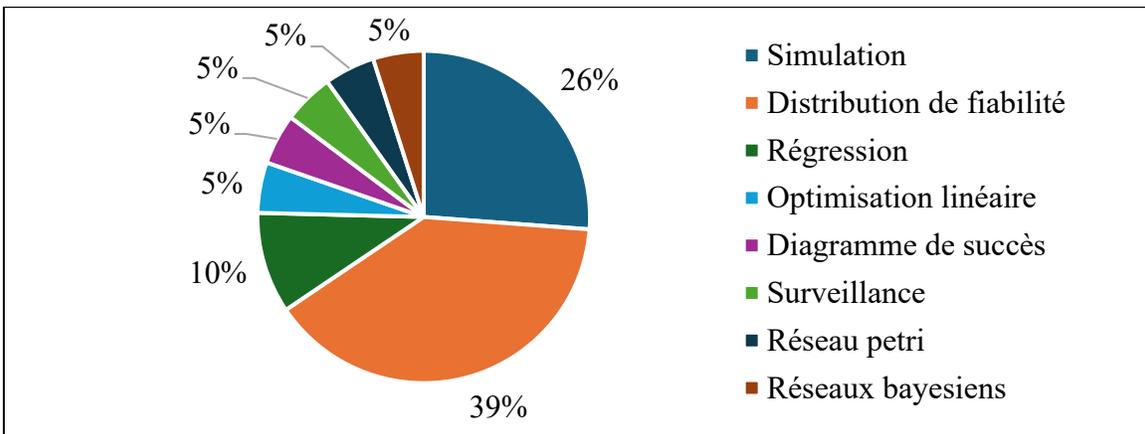


Figure 13 Répartition des méthodes d'évaluation de la probabilité de défaillance

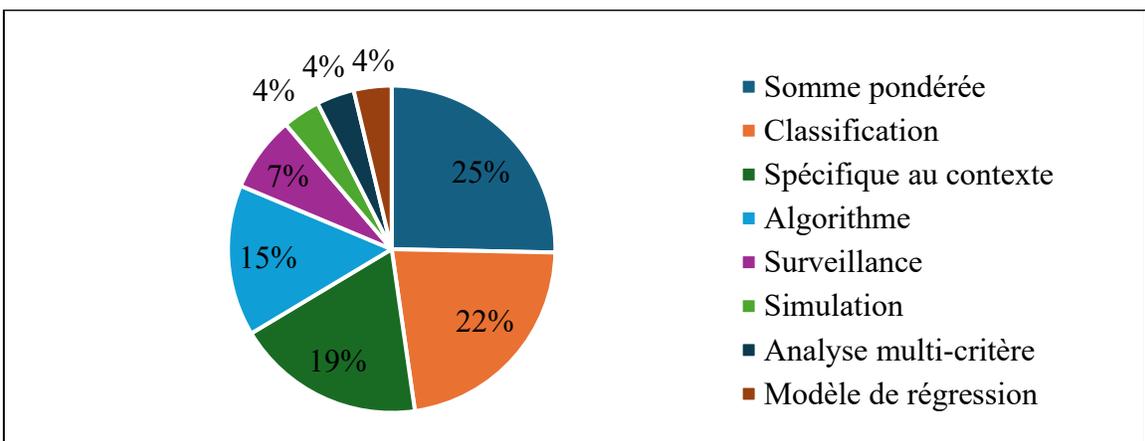


Figure 14 Répartition des méthodes d'évaluation de l'indice de santé

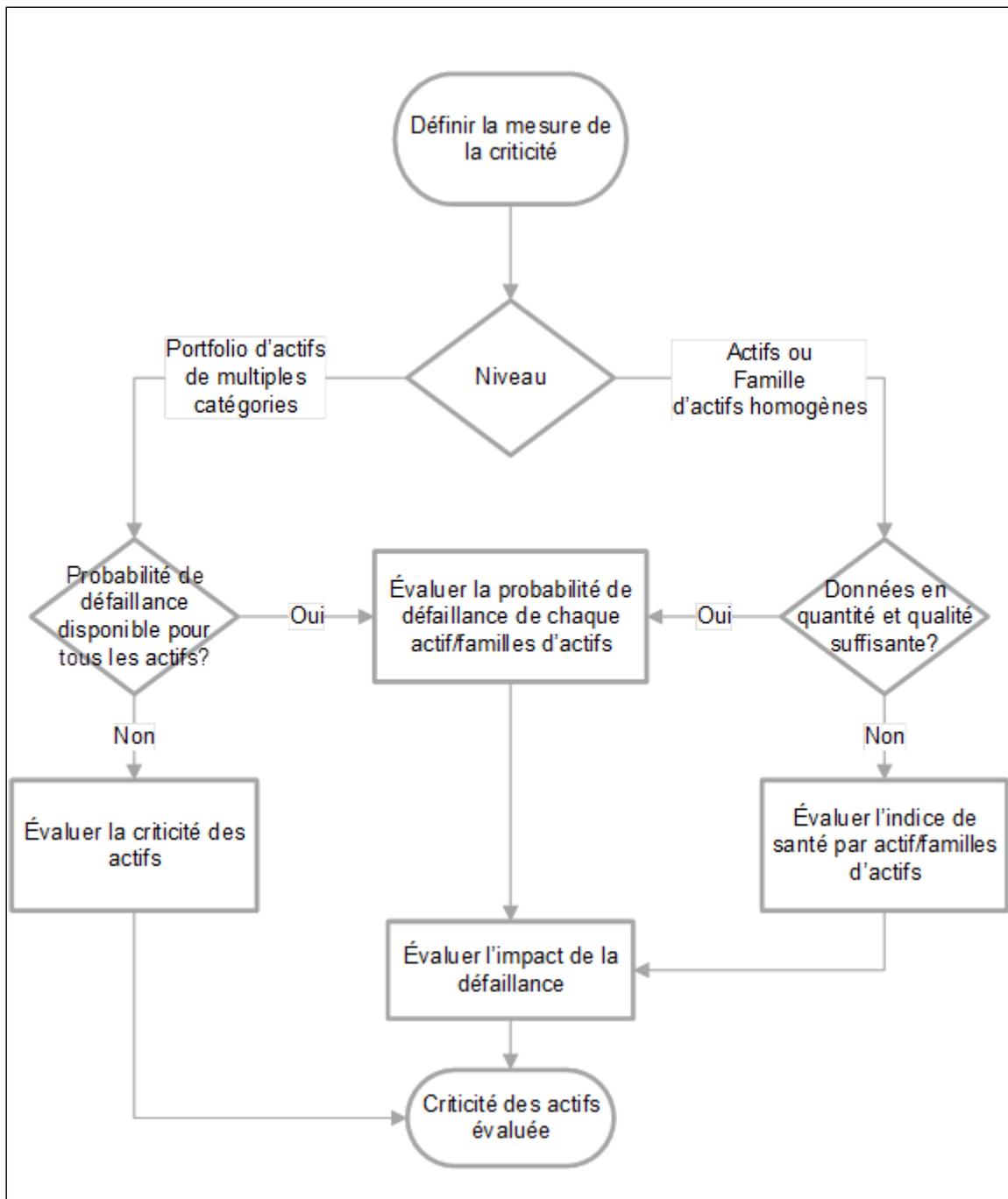


Figure 15 Identification de la méthode d'évaluation de la criticité

Ensuite, le Tableau 9 permet d'identifier la méthode la plus appropriée. Les méthodes proposées sont le résultat de l'observation de la littérature

Tableau 9 Données requises en fonction de la méthode choisie

Méthode	Données requises					Objectif		
	Données de fiabilité externes ou historiques	Taux de défaillance	Distribution de fiabilité	Jugement d'expert/donnée d'inspection	Identification des causes de défaillance	Criticité	Indice de santé	Probabilité défaillance
AMDEC	R*	R*	R*		R	x		
Arbre de défaillance	R*	R*	R*			x		
Classification	R*	R*	R*			x		
Indice de criticité	R*	R*	R*			x		
Matrice de risque	R*	R*	R*	R*		x		
Analyse multicritère	R*	R*	R*			x	x	
Simulation	R*	R*	R*		Op	x	x	x
Algorithme d'IA	R*	R*	R*	R*			x	
Modèle de regroupement	R*	R*	R*	R*			x	
Modèle de régression	R*	R*	R*				x	
Somme pondérée	R*	R*	R*	R	Op		x	
Diagramme de succès	R*	R*	R*					x
Distribution de fiabilité	R				R			x
Réseau de Petri	R	R						x
Réseau bayésien	R			R				x

R = Requis, R = L'un d'entre eux est requis, Op = Facultatif*

De plus, de manière itérative, les résultats d'une analyse peuvent servir d'intrants à d'autres méthodes. Cette itération permet de tendre vers un second objectif. Par exemple, les résultats de l'indice de santé peuvent servir d'entrée à la matrice des risques afin de comparer la criticité des actifs. Ainsi, on peut classer les actifs en fonction de leur probabilité de défaillance, de leur indice de santé ou de l'évaluation de leur criticité, selon le périmètre et les données disponibles.

6.7. *Étape 7 : Définir l'échelle d'évaluation par critère*

Dans l'objectif d'évaluer les caractéristiques des projets d'investissements, les paramètres de calcul permettent d'évaluer chacun des critères. Dans ce cadre méthodologique proposé, chaque critère est évalué sur une échelle ordinale de 5 niveaux.

Afin de de respecter la tolérance au risque actuellement en vigueur dans l'organisation, les éléments distinctifs en termes de gravité, pour les différents critères utilisés dans l'organisation sont également considérés (étape 5). Les échelles d'évaluation doivent être validées par le comité d'expert.

Dans le cas où les orientations de l'organisation à l'étude ne fournissent pas de données suffisantes, les échelles peuvent être proposées par le comité d'expert ou identifiées depuis la littérature (étape 2)

6.8. *Étape 8 : Définir les projets prioritaires pour le plan de gestion des actifs*

Une fois les préférences des décideurs agrégés et représentés par la pondération (étape 7) et l'échelle d'évaluation par critère déterminée (étape 8), la méthode de la somme pondérée est utilisée pour comparer les projets selon l'évaluation de l'incidence sur chacun des critères. Pour ce faire, le score final de chaque alternative est calculé depuis l'équation suivante:

$$Project\ score = \sum_{i=1}^c w_i m_i$$

Où

m_i est le niveau évalué du projet par rapport au critère i depuis l'échelle élaborée

w_i est le poids du critère i pour l'atteinte de l'objectif global.

Ainsi, le score de chacun des projets est calculé en multipliant les poids des critères obtenus de la méthode AHP, ainsi que la méthode BMW. Tous deux offrant les variantes avec la méthode Delphi et la moyenne géométrique.

Une fois les scores de projets calculés, on obtient une hiérarchie de projets en ordre d'importance. Les projets ayant le plus haut score sont ceux qui contribuent le plus aux objectifs de l'organisation. Ils représentent alors les projets à prioriser dans le plan de gestion des actifs.

Ensuite, une fois la hiérarchie de priorité des projets obtenus, les ressources disponibles peuvent guider le nombre de projets qui sera réalisé. En effet, le plan de gestion des actifs peut contenir autant de projets que les ressources disponibles le permettent. Les niveaux de performance attendus peuvent également contribuer à identifier si les ressources disponibles sont suffisantes pour permettre d'atteindre les seuils de performance acceptables ou optimaux.

6.9. *Étape 9 : Réaliser l'analyse de sensibilité*

Afin de comprendre l'effet de l'incertitude, il est nécessaire d'évaluer l'impact de l'incertitude en quantifiant la sensibilité des résultats finaux l'analyse de sensibilité. Cette étape consiste à calculer la variabilité de la pondération pour laquelle le résultat fait varier les résultats finaux.

Ainsi, l'analyse de sensibilité consiste à faire varier la pondération des critères dans l'objectif de déterminer à partir de quelle pondération le projet préféré (rang 1, score le plus élevé) est remplacé par le second projet préférable (rang 2).

Pour ce faire, les pondérations des critères pour lesquels le projet au rang 1 est évalué plus haut que l'option au rang 2 sont modifiées itérativement. Les pondérations des autres critères sont alors ajustées proportionnellement afin de conserver la somme totale des pondérations à 1.

6.1. Contribution de l'industrie 4.0 au cadre méthodologique

Des précédentes sections, on constate que les résultats de priorisation peuvent varier en fonction de la pondération. Avec l'analyse multicritère, les résultats peuvent également varier en fonction de l'évaluation des projets par rapport aux critères. Afin d'atténuer cette variation, les analyses doivent être basées sur des méthodologies appropriées et rigoureuses (Katina et al., 2021).

En ce sens, la présente recherche vise à évaluer l'apport des outils de l'industrie 4.0 pour améliorer la robustesse de l'évaluation des différents critères par projets. Pour ce faire, la Figure 16 résume, pour chacune des étapes, les technologies de l'industrie 4.0 qui sont applicables et le domaine d'application. Les éléments présentés font référence à ceux présentés dans le Chapitre 4.

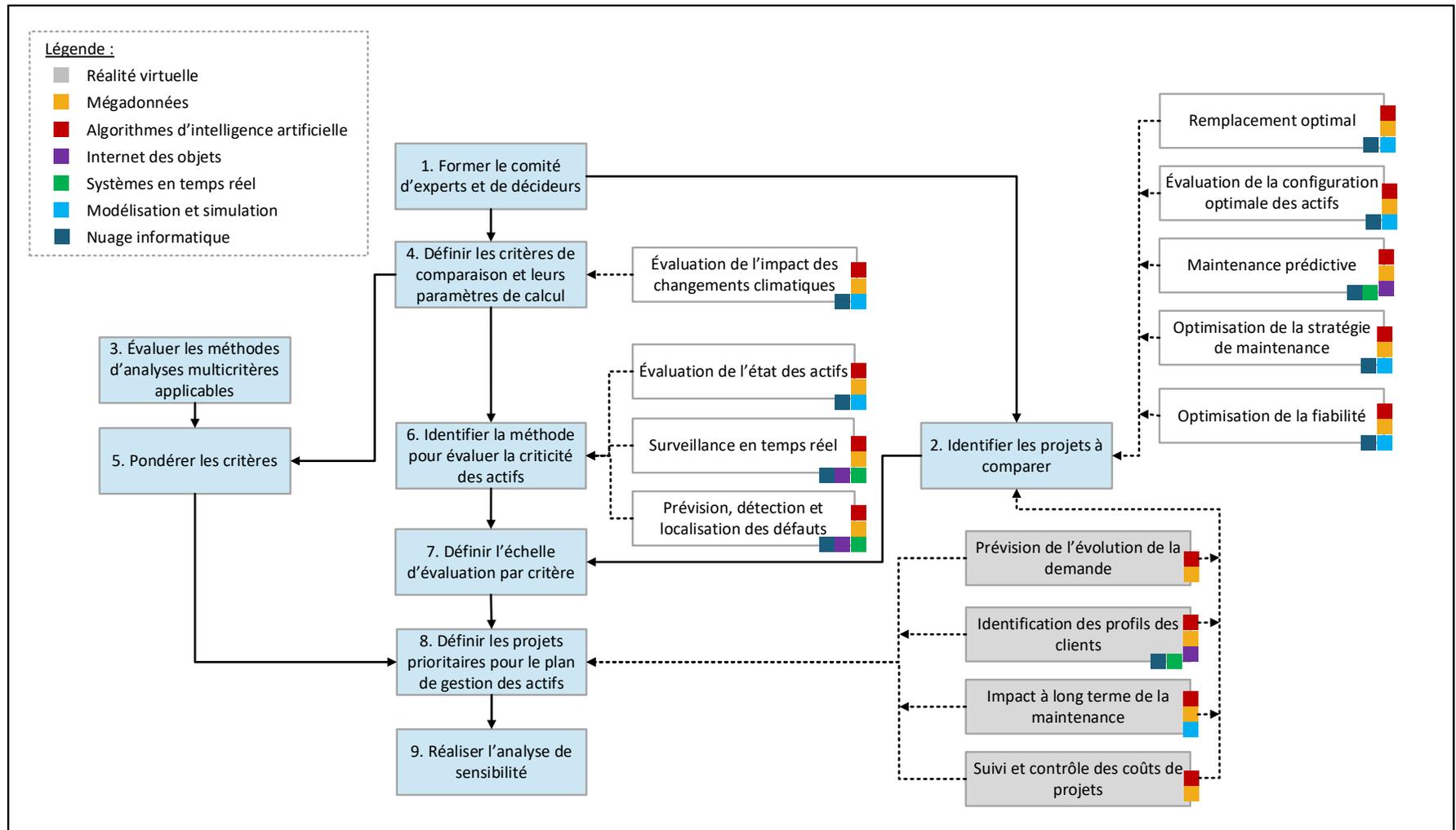


Figure 16 Contribution des outils de l'industrie 4.0 au cadre méthodologique

On observe alors que les outils de modélisation et de simulation sont favorables pour plusieurs étapes. Les modèles de simulation fournissent une quantification explicite et permettent de réaliser des analyses complexes qu'il serait impossible de mettre en œuvre avec les techniques analytiques traditionnelles.

En effet, dans le cas de l'évaluation de la criticité, par exemple, la modélisation et la simulation aident à projeter la dégradation des actifs et les impacts sur l'évaluation des risques (Johnson et al. (2012a)) La modélisation et la simulation permettent aussi d'évaluer la projection de la demande (Cheah et al., 2012; Chen & Chiu, 2015; Günel & Ekti, 2019; Luo et al., 2015). En plus de la projection de la demande, les modèles peuvent combiner les défaillances, les nouveaux actifs, et ainsi le niveau de performance. Butans et Orlovs (2016) Cette modélisation peut alors bénéficier au calcul du respect de la réglementation et des engagements en termes de réponse à la demande.

Par ailleurs, le jumeau numérique, la simulation et la modélisation sont des concepts complémentaires. On peut considérer le jumeau numérique comme le « contenant » de la simulation et de la modélisation (Dembski, Wössner, Letzgus, Ruddat, & Yamu, 2020). Le jumeau numérique peut alors comporter plusieurs outils et technologies complémentaires. Concrètement, un jumeau numérique peut aussi être considéré comme un « bloc » (Schluse, Atorf, & Rossmann, 2017). Cet aspect simplifie la modélisation et la simulation, car c'est alors le jumeau numérique, c'est-à-dire le « bloc » qui renferme les méthodes, les algorithmes et les données de simulation. Le jumeau numérique est alors basé sur l'ensemble des données relatives à l'objet qu'il représente. L'utilisation des jumeaux numériques permet de pallier la complexité liée à la modélisation des systèmes complexes (Biard & Abdul-Nour, 2021).

Ainsi, les principes d'apprentissage automatique peuvent alors être intégrés aux jumeaux numériques, de manière à augmenter itérativement le niveau de précision du modèle. Le traitement des mégadonnées depuis l'intégration d'algorithmes d'IA permet de réduire l'incertitude liée aux analyses.

Les algorithmes d'IA permettent de dégager des tendances dans les données, autrement irréalisables avec les méthodes traditionnelles. Le traitement des mégadonnées permet

aussi d'identifier les modèles de données qui aident à prévoir les défaillances des équipements (Yan et al., 2017). En effet, les algorithmes d'apprentissage automatique (algorithme de K-moyen (Koksal et al., 2017), ou basés les réseaux de neurones et de logique floue (Khalyasmaa & Dmitriev, 2015), par exemple) peuvent améliorer la qualité des données nécessaires aux méthodes d'évaluation de l'indice de santé des actifs (Manninen et al., 2022)(Islam et al., 2017).

L'acquisition des données peut se faire en temps réel, ou non. Le processus de transfert de données est simplifié par l'utilisation de dispositifs fonctionnant à l'aide de l'IdO, ainsi que de l'informatique en nuage. Il est possible d'utiliser l'IdO dans le but de transmettre des informations permettant de prévoir les défaillances ou de calculer la durée de vie résiduelle des actifs (Lee et al., 2015)(Lee et al., 2014). Cette surveillance à distance aide à établir la probabilité de défaillance ou l'indice de santé. Pour les réseaux électriques, l'IdO aide également à évaluer l'état des actifs en améliorant les techniques traditionnelles d'inspection (Zhichun et al., 2019).

Il est à noter que l'utilisation de jumeaux numériques dans les entreprises du secteur de l'électricité pour évaluer l'état des équipements est d'autant plus avantageuse étant donné l'étendue géographique couverte par les actifs. Les inspections fréquentes sont donc irréalistes ou économiquement non justifiables (Gitelman et al., 2019).

CHAPITRE - 7. ÉTUDE DE CAS

Pour mettre en œuvre le cadre méthodologique, ce chapitre démontre l'application des étapes proposées avec l'étude de cas. Tel que précisé précédemment, l'étude de cas porte sur Hydro-Québec (HQ).

La récente réorganisation chez HQ entraîne une vision collaborative des trois fonctions de production, de transport et de distribution (Baril, 2021). Ces fonctions relevaient auparavant de trois domaines d'affaires distincts. Ce changement entraîne la compagnie d'état à revoir la méthode de priorisation des projets d'investissements. Ainsi, un cadre structuré pour supporter des décisions stratégiques par rapport à la répartition optimale des ressources est requise.

Historiquement, la séparation entre les trois domaines d'affaires est liée à l'entrée en vigueur de la loi 116 (*Loi modifiant la Loi sur la Régie de l'énergie et d'autres dispositions législatives*, 2000). Malgré la vision collaborative actuelle, le principe de séparation fonctionnelle demeure appliqué dans l'organisation pour « *toutes les activités où il est nécessaire de prévenir toute forme d'interfinancement ou d'assurer un traitement équitable de l'ensemble des actifs du marché de l'électricité* » (Hydro-Québec (2021)). L'objectif de ces pratiques est de maintenir les coûts d'approvisionnement en électricité à la juste valeur marchande en s'assurant que le volet Production d'HQ ne détient pas d'avantage par rapport aux autres acteurs de production d'électricité. Ainsi, « *tout renseignement qui serait de nature à procurer un avantage au Producteur doit être traité comme une information privilégiée.* » (Hydro-Québec (2012)) Considérant que l'objectif de la présente recherche vise à appliquer une stratégie de gestion des actifs transversale à l'ensemble des domaines d'affaires, cet élément doit être considéré.

7.1. *Étape 1 : Former le comité d'expert et de décideurs*

Le comité est formé d'un ingénieur et d'un gestionnaire responsable de l'établissement des plans de gestion des actifs pour chaque domaine d'affaires. Ainsi, on retrouve trois ingénieurs et trois gestionnaires ayant individuellement comme rôle d'établir la stratégie de gestion des actifs du Producteur, du Transporteur et du Distributeur.

7.2. *Étape 2 : Identifier les projets à comparer*

La recherche adresse les actifs physiques des réseaux de production, de transport et de distribution.

Les projets retenus sont identifiés de manière à couvrir l'ensemble des critères. Cette limitation a pour objectif de confirmer l'applicabilité de la du cadre méthodologique proposé pour l'ensemble des critères. Également, dans l'objectif de couvrir tous les types de réseaux, deux projets par domaine d'affaires (producteur, transporteur et distributeur) sont sélectionnés. Les projets sont également confirmés par le comité d'expert.

7.1. *Étape 3 : Évaluer les méthodes d'analyse multicritères applicables*

L'évaluation est présentée à la section 6.3.

7.2. *Étape 4 : Définir les critères et leurs paramètres de calcul*

En ce qui concerne les objectifs stratégiques de l'entreprise, tout récemment HQ a mis en place son plan d'action 2035 (Hydro-Québec, 2023). Ce plan couvre ces 5 priorités, ainsi que les détails associés : «

1. Améliorer la qualité du service

- *Augmenter nos investissements dans la fiabilité du réseau électrique face aux événements majeurs et aux changements climatiques.*
- *Améliorer nos communications avec la clientèle lors de pannes majeures et proposer des solutions de dépannage pouvant être déployées rapidement.*
- *Accélérer le traitement des demandes d'alimentation en électricité.*

2. Aider notre clientèle à faire une meilleure consommation de l'énergie

- *Doubler les économies d'énergie réalisées par nos clients et clientes afin de dégager de 1 600 à 1 800 MW de puissance supplémentaire à l'horizon 2035*

3. Augmenter la production d'électricité

- *Intégrer au réseau d'Hydro-Québec de nouveaux actifs qui permettront, en complément de nos efforts en efficacité énergétique et en gestion des pointes, de répondre à des besoins de puissance additionnels d'entre 8 000 et 9 000 MW.*
 - *Explorer le potentiel d'autres filières énergétiques pour le Québec en considérant l'ensemble des solutions, éprouvées ou en développement.*
 - *Déployer des infrastructures de transport pour permettre le raccordement de nouvelles installations de production et de projets porteurs pour le Québec.*
4. *Collaborer plus étroitement avec les communautés autochtones*
- *Créer des occasions pour les communautés autochtones de prendre part aux nouveaux projets énergétiques et d'en faire des sources de prospérité durable.*
 - *Travailler avec les communautés autochtones pour accroître la représentation des Premières Nations et des Inuits dans les activités d'Hydro-Québec.*
5. *Devenir une organisation agile, innovante et transparente*
- *Tirer parti des expertises complémentaires à celles d'Hydro-Québec pour élaborer la feuille de route de la décarbonation et réaliser la transition énergétique et économique de la façon la plus efficiente possible.*
 - *Adapter nos façons de faire pour gagner en rapidité dans la réalisation de nos activités*
 - *Investir dans nos employés et employées pour stimuler l'innovation et accroître notre capacité à répondre aux besoins évolutifs de notre clientèle.*
» (Hydro-Québec, 2023)

En observant ce plan, on peut identifier les critères de performance attendus qui guideront la priorisation des investissements. Les orientations et stratégies, ainsi que les critères associés sont identifiés dans le Tableau 10.

Tableau 10 Critères de performance associés aux orientations stratégiques

Priorité	Santé et sécurité	Environnement	Réglementaire	Coûts	Productivité	Maintenabilité	Fiabilité	Résilience
Améliorer la qualité du service			X		X		X	X
Aider notre clientèle à faire une meilleure consommation de l'énergie				X	X			
Augmenter la production d'électricité		X			X			
Collaborer plus étroitement avec les communautés autochtones					X			
Devenir une organisation agile, innovante et transparente		X		X				

Ensuite, une observation de l'ensemble des critères et paramètres d'évaluation utilisés par les différents domaines d'affaires de l'entreprise est réalisée. Actuellement, aucune ne combine la comparaison de projets de Production, de Transport et de Distribution dans un seul outil de comparaison. Ainsi, selon le domaine d'affaire, les critères visent différents types d'activités, soit les activités de maintenance, de remplacement d'actifs, de risque relatif à la non-réalisation des projets, etc.

Les critères retenus sont identifiés C1 à C7.

7.1. *Étape 5 : Pondérer les critères*

Pour la méthode AHP, les résultats de la comparaison des critères obtenus par la méthode Delphi et par la moyenne géométrique sont présentés dans le Tableau 11 et le Tableau 13 respectivement. Le Tableau 12 et le Tableau 14 présentent les matrices normalisées associées aux résultats de ces deux méthodes, ainsi que le ratio de cohérence respectif. On constate que le ratio de cohérence pour la méthode Delphi ne respecte pas la limite de cohérence maximale de 10%. La méthode de la moyenne géométrique fournit pour sa part un ratio de cohérence plus faible que la méthode Delphi et respectant la limite maximale.

Tableau 11 Matrice d'évaluation par paire des critères selon la méthode Delphi avec la méthode AHP

Critères ↓ est plus ou moins important que →	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	3	3	1/7	3	5	5
C2	1/3	1	3	1/7	3	5	5
C3	1/3	1/3	1	1/5	1	3	5
C4	7	7	5	1	7	7	7
C5	1/3	1/3	1	1/7	1	1	3
C6	1/5	1/5	1/3	1/7	1	1	1/3
C7	1/5	1/5	1/5	1/7	1/3	3	1

Tableau 12 Matrice normalisé selon la méthode Delphi et vecteur de priorité avec la méthode AHP

Matrice normalisée	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Total	Vecteur des priorités (VP)	Vecteur de somme pondérée (SP)	SP/VP
C1	0,11	0,25	0,22	0,07	0,18	0,20	0,19	1,22	0,1750	1,51	8,61
C2	0,04	0,08	0,22	0,07	0,18	0,20	0,19	0,99	0,1412	1,11	7,85
C3	0,04	0,03	0,07	0,10	0,06	0,12	0,19	0,61	0,0875	0,67	7,67
C4	0,74	0,58	0,37	0,52	0,43	0,28	0,27	3,19	0,4559	4,09	8,97
C5	0,04	0,03	0,07	0,07	0,06	0,04	0,11	0,43	0,0610	0,49	7,97
C6	0,02	0,02	0,02	0,07	0,06	0,04	0,01	0,25	0,0359	0,27	7,50
C7	0,02	0,02	0,01	0,07	0,02	0,12	0,04	0,31	0,0437	0,32	7,27
Moyenne											7,98
Indice de cohérence (CI)											0,16
Indice de cohérence de référence (RI)											1,32
Ratio de cohérence (CR)											0,12

Tableau 13 Matrice d'évaluation par paire des critères selon la moyenne géométrique avec la méthode AHP

Critères ↓ est plus ou moins important que →	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1,00	1,93	1,53	0,42	1,11	1,63	1,69
C2	0,52	1,00	1,11	0,31	0,90	1,53	1,53
C3	0,65	0,90	1,00	0,25	1,00	1,84	2,37
C4	2,37	3,27	4,08	1,00	4,36	5,16	3,94
C5	0,90	1,11	1,00	0,23	1,00	1,55	1,25
C6	0,61	0,65	0,54	0,19	0,64	1,00	0,64
C7	0,59	0,65	0,42	0,25	0,80	1,55	1,00

Tableau 14 Matrice normalisé selon la moyenne géométrique et vecteur de priorité avec la méthode AHP

Matrice normalisée	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Total	Vecteur des priorités (VP)	Vecteur de somme pondérée (SP)	SP/VP
C1	0,15	0,20	0,16	0,16	0,11	0,11	0,14	1,03	0,15	1,05	7,13
C2	0,08	0,10	0,11	0,12	0,09	0,11	0,12	0,73	0,10	0,75	7,14
C3	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,13	0,19	0,81	0,12	0,82	7,12
C4	0,36	0,34	0,42	0,38	0,44	0,36	0,32	2,62	0,37	2,68	7,16
C5	0,14	0,12	0,10	0,09	0,10	0,11	0,10	0,75	0,11	0,77	7,12
C6	0,09	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,05	0,48	0,07	0,48	7,10
C7	0,09	0,07	0,04	0,10	0,08	0,11	0,08	0,57	0,08	0,57	7,06
Moyenne											7,12
Indice de cohérence (CI)											0,02
Indice de cohérence de référence (RI)											1,32
Ratio de cohérence (CR)											0,02

Pour la méthode BWM, le Tableau 15 présente la comparaison par paire du pire et du meilleur critère par rapport aux autres critères.

Le Tableau 16 présente la pondération des critères. L'évaluation est établie selon la méthode Delphi et la moyenne géométrique. La pondération des critères et le calcul du ratio de cohérence sont faits avec le solveur Excel (Rezaei) développé par l'auteur.

Tableau 15 Comparaison par paire du meilleur et pire critère avec la méthode Delphi

	Critère	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Meilleur	C4	7	7	5	1	7	7	7
Pire	C7	1/5	1/5	1/5	1/7	1/3	1	1

Tableau 16 Pondération des critères avec la méthode BWM

Méthode	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Delphi	0,09	0,09	0,12	0,47	0,09	0,05	0,09
Moyenne géométrique	0,19	0,14	0,11	0,24	0,11	0,09	0,12

Avec la méthode BWM, on constate une légère incohérence par le fait que la plus petite pondération n'est pas attribuée au « pire » critère. Ceci est également confirmé par le ratio de cohérence évalué à 0,15 et 0,21 pour la méthode Delphi et la moyenne géométrique, respectivement.

On constate alors que, malgré le fait que le comité d'expert se soit entendu sur le fait que le pire critère correspond au critère C7, la répartition des préférences illustre que le critère de C6 a une pondération moins importante et donc, qu'il s'agit du critère qui aurait dû être identifié comme le moins important. Ceci influence le niveau de cohérence négativement.

7.2. *Étape 6 : Identifier la méthode pour évaluer la criticité des actifs*

Ensuite, selon le processus d'identification de la méthode optimale pour l'évaluation de la criticité des actifs (étape 3), la méthode la plus appropriée est identifiée.

La matrice de risque est la méthode retenue pour évaluer le paramètre de criticité dans le cas de la présente recherche. La matrice de risque est un des outils pertinents pour jumeler les informations du calcul de la criticité (probabilité et impact) et, ainsi, évaluer le niveau de risque de l'actif. La matrice de risque est aussi un outil privilégié par plusieurs auteurs pour aider la prise de décision basée sur l'analyse des risques (Minnaard, 2013; Vermeer, Wetzer, Wielen, Haan, & Meulemeester, 2015; Wheeldon & Hayes, 2012). Ce choix s'explique par son aspect visuel simplifiant sa compréhension par l'ensemble de la hiérarchie. En utilisant cette méthode, l'influence du projet sur le risque est alors quantifiable.

Toutefois, on note des limitations à l'utilisation des matrices de risques. Entre autres, on reconnaît que l'évaluation de l'axe de gravité peut être subjectif et qu'elle peut fournir un résultat inadéquat si certains éléments comportent une grande variance. On observe aussi une limitation dans l'évaluation des risques si les deux axes sont négativement corrélés.

Cependant, il est entendu que l'utilisation de cet outil est trop popularisée pour cesser son utilisation. L'outil doit toutefois être appliqué avec précaution (Cox, 2008). Un autre

auteur confirme cette analyse, mais précise qu'elles sont bénéfiques lorsqu'une quantification précise n'est pas disponible (Duijm, 2015). C'est le cas de la présente étude. Ainsi, la coloration de la matrice de risque fournit une évaluation du risque et permet de contrer les limitations de l'outil. La coloration définit alors la fonction croissante de l'évaluation de la probabilité de défaillance et des impacts associés (Duijm, 2015).

7.3. *Étape 7 : Définir l'échelle d'évaluation par critère*

Les échelles d'évaluation de chaque critère individuel ont été analysées de manière à suggérer des échelles communes. Ainsi, chaque critère est évalué sur une échelle ordinale de 5 niveaux. Les échelles d'évaluation sont également validées par le comité d'expert. L'Annexe E présente les échelles proposées.

7.4. *Étape 8 : Définir les projets prioritaires pour le plan de gestion des actifs*

Les projets prioritaires correspondent aux projets qui ont le plus haut score total. Pour évaluer le score, la méthode de la somme pondérée est utilisée. Le niveau évalué de chaque projet par rapport à l'échelle identifiée à l'étape 7 et à l'Annexe E est présenté dans le Tableau 17.

Les poids sont identifiés précédemment dans la section 7.1 (étape 5). Les scores des projets sont présentés dans le Tableau 18.

Tableau 17 Évaluation des projets en fonction de l'échelle d'évaluation

ID	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
T1	0	4	2	4	0	0	5
T2	0	4	-4	4	0	1	1
P1	2	1	0	4	0	0	1
P2	1	1	0	4	0	3	1
D1	0	0	5	2	3	0	1
D2	5	0	0	3	0	4	1

Tableau 18 Score des projets

ID	BWM - moyenne géométrique	BWM - Delphi	AHP - moyenne géométrique	AHP - Delphi
T1	2,61	2,87	1,61	1,51
T2	1,39	2,03	0,78	0,56
P1	1,49	2,25	1,43	1,47
P2	1,66	2,30	1,30	1,15
D1	1,64	1,85	1,15	1,10
D2	1,73	2,14	2,61	2,75

La priorisation des projets obtenue est présentée dans le Tableau 19. On constate toutefois que le classement des projets varie selon la méthode retenue. Ces distinctions sont discutées dans le chapitre suivant.

Tableau 19 Hiérarchie de priorité des projets

BWM - moyenne géométrique	BWM - Delphi	AHP – moyenne géométrique	AHP - Delphi
T1	T1	D2	D2
D2	P2	T1	T1
P2	P1	P1	P1
D1	D2	P2	P2
P1	T2	D1	D1
T2	D1	T2	T2

7.5. Étape 9 : Réaliser l'analyse de sensibilité

Pour réaliser cette étape, les pondérations des critères pour lesquels le projet au rang 1 est évalué plus haut que l'option au rang 2 sont modifiées itérativement. Les pondérations des autres critères sont alors ajustées proportionnellement afin de conserver la somme totale des pondérations à 1. Par exemple, pour BWM avec la méthode Delphi, le projet T1 est le projet au rang 1. Le projet P2 est le projet au rang 2. Selon les données du Tableau 19, le projet P2 obtient une évaluation plus élevée que le projet T1 pour les critères de Productivité et de Résilience. Afin que le projet P2 dépasse le score de T1, voici les modifications à faire à ces deux critères, indépendamment :

- C6 : augmenter de 0.165 point, pour une pondération totale de 0,254. Augmentation de 286% par rapport à la pondération actuelle de 0.089
- C1 : augmenter de 0.135 point, pour une pondération totale de 0.240. Augmentation de 228% par rapport à la pondération actuelle de 0.105.

L'analyse de sensibilité de l'ensemble des méthodes est présentée dans le Tableau 20. On note que les pondérations doivent plus de doubler pour faire varier l'ordre de priorité des projets. Les résultats sont donc considérés robustes.

Tableau 20 Analyse de sensibilité par méthode

Méthode	Critère	Augmentation requis	Pondération originale	Variation
AHP - Delphi	C2	0,200	0,175	214%
AHP - Delphi	C3	0,214	0,141	252%
AHP - Delphi	C4	0,506	0,088	678%
AHP - Delphi	C7	0,229	0,036	739%
AHP - moy. géo.	C2	0,172	0,148	216%
AHP - moy. géo.	C3	0,203	0,105	293%
AHP - moy. géo.	C4	0,444	0,116	483%
AHP - moy. géo.	C7	0,188	0,068	376%

Méthode	Critère	Augmentation requis	Pondération originale	Variation
BWM - Delphi	C6	0,148	0,047	415%
BWM - Delphi	C1	0,117	0,089	232%
BWM - moy. géo	C6	0,165	0,089	286%
BWM - moy. géo	C1	0,135	0,105	228%

CHAPITRE - 8. ANALYSE ET RECOMMANDATIONS

La présente section vise à évaluer la robustesse des résultats et à comparer les méthodes. Afin de comparer l'efficacité des méthodes, il est d'abord nécessaire d'évaluer le ratio de cohérence. Les ratios de cohérence obtenus par méthodes sont les suivants :

- AHP – Moyenne géométrique : 2%
- AHP – Delphi : 12%
- BWM – Moyenne géométrique : 21%
- BWM – Delphi : 15%

Pour la méthode BWM, le solveur (Rezaei) indique qu'un ratio inférieur à 31.44% respecte le niveau de cohérence. Les ratios de cohérences de la méthode BWM respectent donc la limite.

Pour l'AHP, la méthode de la moyenne géométrique est la seule qui fournit un résultat respectant le critère du ratio de cohérence à moins de 10%. Afin d'obtenir un ratio de cohérence plus faible, il est nécessaire d'utiliser les niveaux intermédiaires (2,4,6,8) dans la comparaison par paire des critères. Ces niveaux intermédiaires permettent d'identifier la légère différence spécifiée par le comité d'expert pour le critère de C2 par rapport au critère C3.

Cette seconde analyse plus précise permet d'obtenir un ratio de cohérence de 9,6%. Bien qu'élevé, ce ratio respecte la limite. Toutefois, cette seconde méthode requiert davantage de temps et d'analyse. La Figure 17 illustre les pondérations des critères en fonction des méthodes et de leurs variantes.

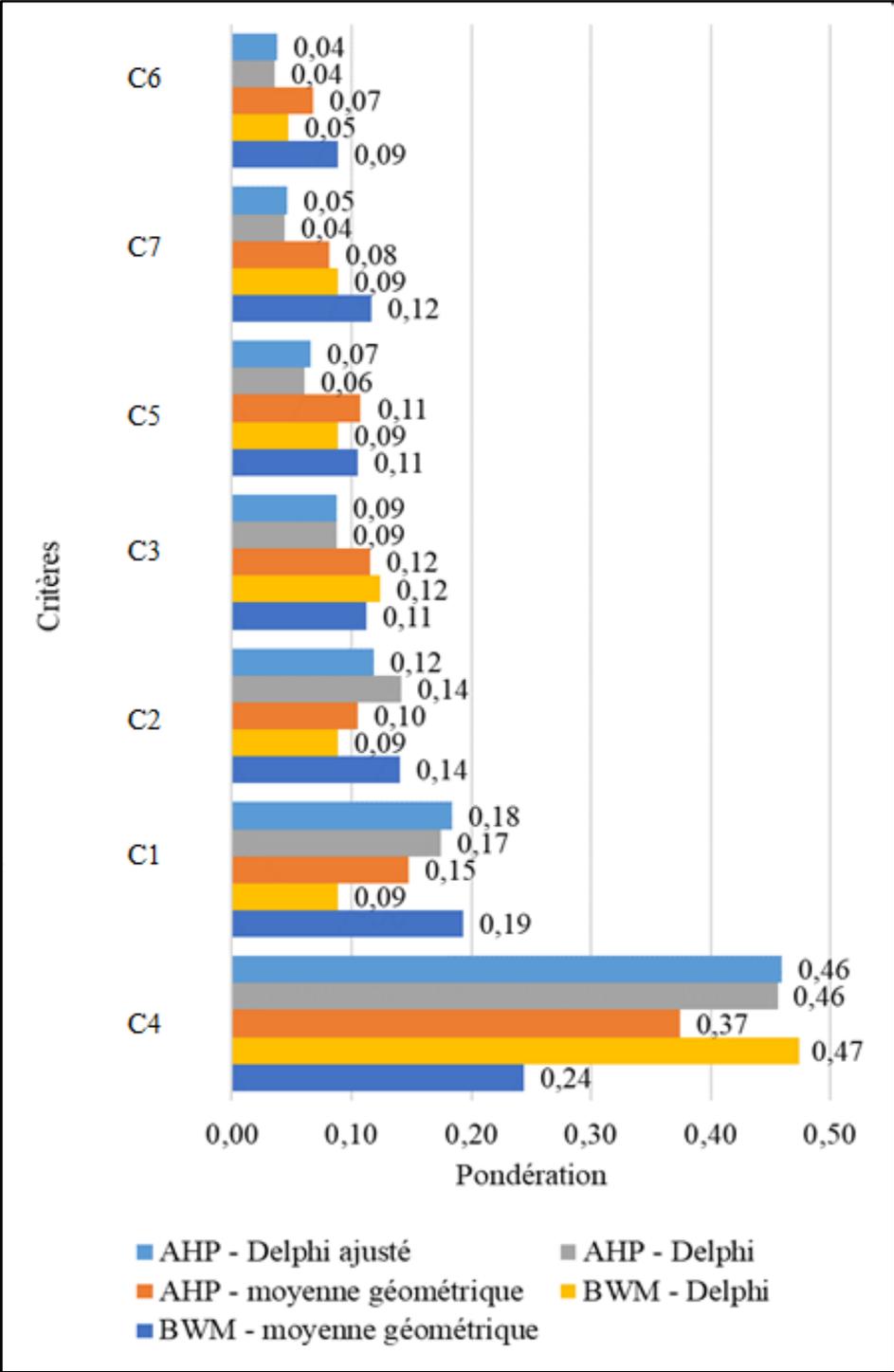


Figure 17 Pondérations des critères selon la méthode AHP et BWM

Depuis cette dernière figure, on constate que, dans tous les cas, C4 est le critère le plus important. Par ailleurs, on constate que les résultats démontrent que le critère ayant la pondération la moins élevée est le critère C6. Cette pondération confirme le niveau d'adhérence inégal de tous les décideurs pour le « pire » critère déterminé par la méthode BWM.

En effet, dans le cas de la méthode BWM, bien que les membres du comité identifient un « meilleur » et un « pire » critère, les évaluations démontrent un résultat différent par rapport à l'identification du pire critère. Dans la réalisation de la méthode avec le comité d'experts, les décideurs ont eu de la difficulté à trancher entre deux critères pour l'identification du « pire » critère. Ceci se reflète alors dans le niveau de cohérence également. La méthode BWM fournit également des pondérations similaires pour plusieurs critères différents, ce qui limite la distinction des évaluations des projets et la priorisation.

On constate alors que le choix de la méthode influence l'ordonnement de priorisation des projets. La Figure 18 illustre la répartition des scores des projets selon la méthode utilisée.

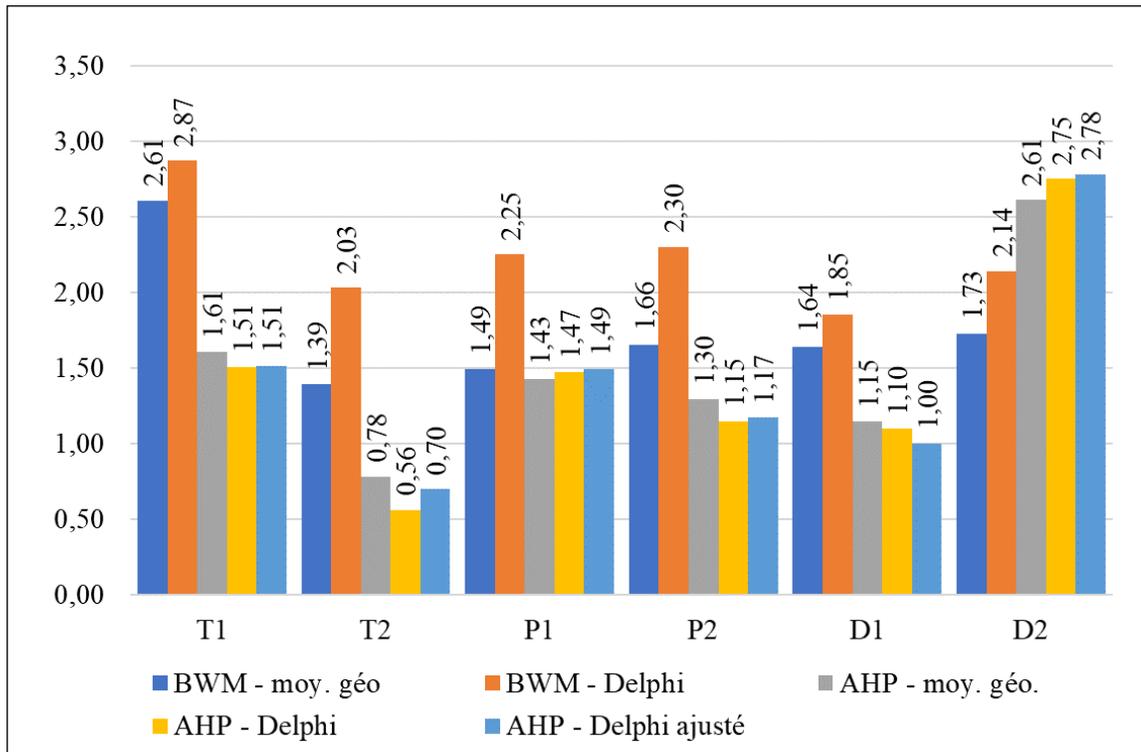


Figure 18 Score des projets selon la méthode utilisée

De cette figure, on constate que pour l'AHP, la priorisation demeure la même, peu importe la variante et même malgré la limitation de cohérence de la méthode Delphi. Pour la BWM, la priorisation diffère selon la variante, malgré la cohérence acceptable des deux variantes. La priorisation est également différente de la méthode AHP. De ce fait, les résultats obtenus par la méthode BWM semblent inconsistants.

Bref, bien que la méthode BWM permette un gain de temps dans l'évaluation des critères, les résultats ne permettent pas d'assurer une représentativité précise et distincte des préférences des décideurs. Le gain de temps pour l'évaluation des critères est également modéré par une session de discussion plus longue pour la méthode Delphi. Cette session plus longue est due à une entente plus laborieuse sur le « pire » critère. Le gain de temps au niveau de l'évaluation par paire des critères est donc compensé par le temps requis pour déterminer le « meilleur » et « pire » critère par consensus.

En ce qui concerne l'AHP en plus d'obtenir un ratio de cohérence faible rapidement, la moyenne géométrique permet un gain de temps notable par rapport à la méthode Delphi pour réaliser la comparaison des critères. Ce gain s'explique par le fait que la moyenne géométrique permet d'éviter les multiples rencontres occasionnées par la méthode Delphi. Malgré ces multiples rencontres, la cohérence n'est pas assurée et un second ajustement est nécessaire pour obtenir un ratio de cohérence acceptable, mais qui demeure plus élevé que la moyenne géométrique.

Ainsi, selon ces observations, la méthode AHP incluant la compilation des résultats de chaque décideur par la moyenne géométrique est à privilégier. Toutefois, pour assurer l'efficacité de la méthode et le niveau de précision suffisant, on doit fournir les explications et la définition claires et documentées pour chaque critère. Le comité d'expert doit aussi être rencontré préalablement afin d'assurer une compréhension commune et juste de chaque critère.

CHAPITRE - 9. CONCLUSION

La priorisation des investissements est un défi pour les organisations qui détiennent des portefeuilles d'actifs de multiples catégories. Dans un contexte de changement climatique, de vieillissement des actifs et d'exigences croissantes de performance et de rentabilité, on note plusieurs défis interdépendants. Parmi ceux-ci, on trouve :

- Une augmentation significative de l'investissement en gestion des actifs
- Des ressources financières et humaines limitées
- Un besoin de prioriser les investissements pour répondre à l'objectif global d'une organisation, incluant divers critères décisionnels.

Pour pallier ces problèmes, l'objectif principal de cette recherche est de développer un cadre méthodologique pour supporter la prise de décision relative aux investissements pour la gestion des actifs dans un système complexe intelligent. La recherche cible plus précisément les industries électriques.

Par ailleurs, le cadre méthodologique proposé considère les facteurs relatifs au contexte émergent dans lequel évoluent les organisations qui détiennent des portefeuilles de multiples catégories. Ce contexte inclut, entre autres, la présence de systèmes complexes, les interdépendances entre les ressources limitées, ainsi que la multiplicité d'objectifs distincts à rencontrer.

En considérant les résultats préalables de la revue de littérature, on peut affirmer que les principaux éléments qui permettraient de surmonter les défis de gestion des actifs auxquels sont exposées les entreprises qui produisent, transportent et distribuent l'électricité sont :

- La priorisation des projets d'investissements depuis les méthodes de décision multicritères

- La nécessité de réduire l'incertitude liée aux systèmes complexes par l'élaboration de méthodologies robustes pour l'évaluation des critères de comparaison, notamment le critère de criticité.

En ce qui concerne l'utilisation de l'analyse multicritère, les méthodes applicables sont analysées et les paramètres de comparaison des projets sont identifiés. On constate que la méthode optimale pour la priorisation des investissements pour les portefeuilles d'actifs de multiples catégories est la méthode AHP, combinée à la méthode de la somme pondérée. Le cadre méthodologique proposé inclut la combinaison de l'opinion de multiples décideurs via la moyenne géométrique.

L'utilisation de la méthode multicritère permet également d'intégrer différents modules provenant d'études ou d'intrants complémentaires. Ces intrants complémentaires permettent de bonifier le modèle d'aide à la décision, en renforçant le niveau de précision de l'évaluation de chaque projet.

Le critère de criticité est l'un des critères principaux pour la priorisation des investissements en gestion des actifs. En ce sens, la présente recherche identifie les méthodes utilisées pour évaluer la criticité des actifs et ainsi, atténuer l'impact de l'incertitude sur ce critère.

Ensuite, afin de renforcer le niveau de précision de l'évaluation de la criticité et des autres critères, la recherche fournit des observations sur les nouvelles technologies apportées par l'industrie 4.0 qui contribuent à la prise de décision en gestion des actifs et qui peuvent atténuer l'impact de l'incertitude sur les choix des projets.

Finalement, le cadre méthodologique de priorisation des projets proposée est confirmé par l'élaboration d'une étude de cas une entreprise qui produit, transporte et distribue de l'électricité. Les étapes de la réalisation sont présentées. La portée du cas d'application de cette recherche englobe tous les actifs des réseaux de production, de transmission et de distribution dans un seul modèle d'aide à la décision. Les résultats de l'étude de cas

confirment que le cadre méthodologique proposé permet d'optimiser l'allocation des ressources aux systèmes et équipements les plus critiques, afin d'atteindre les objectifs corporatifs visés.

9.1. Contribution de la recherche

La particularité de cette analyse est le fait qu'elle se distingue par un cadre plus large que la priorisation des activités de maintenance ou d'une seule catégorie d'équipement. Le champ d'application de l'étude s'étend à tous les projets d'investissement pour la gestion des actifs. De manière générale dans la littérature, on observe un faible nombre d'analyses des méthodes utilisées pour prioriser les actifs pour portfolio d'actifs de multiples catégories, dans toutes les phases de leur cycle de vie.

Également, une autre particularité de la recherche est le fait que la priorisation des projets d'investissements inclut, mais ne se limite pas à l'atteinte d'un seuil de fiabilité et d'un niveau de dépense minimal. Elle couvre également la méthode de calcul des critères de comparaison de manière détaillée.

Aussi, l'apport de l'industrie 4.0 à la prise de décision pour les investissements en gestion d'actifs est encore un sujet peu abordé dans la littérature. Les études se concentrent souvent sur l'impact d'un outil de l'industrie 4.0 sur la priorisation des investissements, et ce, dans un contexte très spécifique. La contribution de la recherche est représentée par l'observation des technologies de l'industrie 4.0 pour évaluer la criticité des actifs. Cette hiérarchisation d'actifs par criticité permet d'identifier les équipements critiques, dans le but de prioriser les projets d'investissements, depuis l'analyse multicritère.

Bref, la recherche se distingue par sa portée, mais également par l'intégration des systèmes complexes et des multiples objectifs distincts et difficilement comparables des organisations. Elle se distingue aussi par sa capacité à réduire l'incertitude dans la prise de décision pour les systèmes complexes, ainsi que par sa capacité d'adaptation en fonction des données disponibles, des objectifs de l'organisation.

9.2. Publications prévues et publiées

Les articles suivants en lien avec la présente recherche sont publiés :

1. Contribution de l'industrie 4.0 à la gestion des actifs de l'industrie électrique
2. Méthode d'analyse multicritères pour la priorisation des investissements dans la gestion des actifs de l'industrie électrique
3. L'utilisation des jumeaux numériques pour évaluer la fiabilité des actifs des réseaux électriques
4. Les méthodes pour comparer la fiabilité d'un portfolio d'actifs.

L'article 1 est publié dans la revue Sustainability (Biard & Abdul-Nour, 2021).

L'article 2 est publié dans le numéro spécial de la 10e conférence de l'IFAC (*Internal Federation of Automatic Control*) sur la modélisation, gestion et contrôle de fabrication (*Manufacturing modelling, management and control* (MIM)) (Biard, Abdul-Nour, Komljenovic, & Pelletier, 2022). Il a également reçu une invitation à envoyer une version plus développée, intégrant l'étude de cas au journal IJPR (International Journal of Production Research).

L'article 3 est publié dans le numéro spécial du 5^e atelier de l'IFAC sur l'ingénierie, les services et la technologie de maintenance avancée (*Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology* ou AMEST) (Biard & Abdul-Nour, 2022).

L'article 4 est l'extension d'un article de congrès (WCEAM2022), qui paraît dans un volume de la série Lecture Notes in Mechanical Engineering du livre 16th WCEAM Proceedings (Biard & Nour, 2023).

9.3. Recherches futures

Dans la présente recherche, seul un cadre méthodologique à haut niveau est présenté. En effet, la proposition définit un premier modèle d'aide à la décision pour la gestion des

actifs d'un portfolio d'actifs de multiples catégories dans les entreprises qui produisent, transportent et distribuent de l'électricité. Il s'agit également d'un premier état de l'art de la contribution de l'industrie 4.0 à la priorisation des projets d'investissements dans ce contexte.

Le cadre méthodologique proposé vise donc à définir une structure permettant de combiner dans un deuxième temps d'autres approches et méthodologies dans cet unique modèle d'aide à la décision. L'objectif de cette conception modulaire est de permettre une meilleure adaptabilité aux recherches futures. Les recherches futures visent alors à développer les intrants complémentaires qui permettent de bonifier le modèle d'aide à la décision.

De manière générale, chaque critère pourrait être représenté par une analyse complémentaire, incluant les outils de l'industrie 4.0 et plus spécifiquement l'IA pour le traitement des mégadonnées.

En ce sens, l'élaboration de jumeaux numériques pourrait être pertinente. Ces jumeaux numériques doivent intégrer des algorithmes d'IA pour le traitement des données. Les jumeaux numériques doivent représenter l'ensemble du portfolio d'actifs afin de pallier l'évaluation de performance, de criticité ou de coûts actuellement incompatible pour l'ensemble des systèmes. Il est démontré que la création de plusieurs jumeaux numériques individuels, développés selon une structure hiérarchique et interconnectée peut permettre de pallier la complexité liée à l'utilisation de cette technologie pour les systèmes complexes. Cependant, dans le cas des systèmes complexes on reconnaît que la capacité d'intégrer des jumeaux numériques entre eux est encore très faible (Julien & Martin, 2020). Pour que cela soit réalisable, l'objectif des jumeaux, leur niveau de détail, ainsi que leur niveau d'exactitude doit être similaire ou intégrable. L'approche proposée par Jiang, Lv, Li et Guo (2021) démontre l'applicabilité de cette méthode. Julien et Martin (2020) reconnaissent qu'il est plus efficace de se concentrer sur les processus les plus critiques. Ainsi, on doit d'abord considérer les éléments critiques, comme le propose le modèle de

Tang et al. (2021). Également, considérant les coûts relatifs au développement d'un jumeau numérique, il serait intéressant de limiter cette approche pour les actifs les plus critiques, coûteux ou importants et conserver des méthodes classiques pour les autres actifs.

Dans ce même ordre d'idée, une recherche complémentaire incluant l'ajout d'une modélisation du système pourrait avoir comme objectif d'évaluer l'effet du choix d'un projet d'investissements par rapport à un autre sur un objectif corporatif visé.

Ensuite, il est démontré que, pour la prise de décision en contexte d'incertitude, l'évaluation des paramètres de performance de chaque alternative est incertaine. Une recherche complémentaire devrait approfondir l'impact de l'incertitude dans la prise de décision. Les méthodes permettant d'atténuer son effet pour chaque critère et globalement doivent aussi être évaluées.

Aussi, tel que mentionné dans la littérature, l'évaluation de la fiabilité humaine doit être prise en compte dans l'analyse de la criticité, de l'indice de santé et de la probabilité de défaillance pour les systèmes hautement critiques et à haut risque (Rozuhan, Muhammad, & Niazi, 2020).

Par ailleurs, la présente recherche intègre des projets déjà proposés et documentés par les experts. Une recherche complémentaire pourrait viser l'élaboration d'un outil permettant d'identifier les projets d'investissements, avant l'analyse technicoéconomique des experts. En ce sens, la modélisation et la simulation pourraient identifier des projets en fonction de la probabilité de défaillance des actifs selon leur état, ainsi que l'impact potentiel de la défaillance. Pour ce faire, les niveaux de performance attendus, ainsi que les seuils de tolérance aux risques doivent d'abord être statué afin d'identifier les actifs ne respectant pas ou qui ne respecteront pas ces seuils à court, moyen ou long terme.

D'autre part, l'utilisation de méthodes alternatives pour l'évaluation des critères, telles que l'analyse de correspondances multiples, le tableau des fréquences, etc. pourrait

également être comparé en termes d'efficacité de réalisation du cadre proposé. L'efficacité de l'analyse par enveloppement de données (DEA) pour faciliter l'établissement des poids pourrait aussi être considérée.

Finalement, la présente recherche considère l'indépendance des critères comme hypothèse. Toutefois, une recherche complémentaire devrait permettre d'intégrer la notion de dépendance dans l'élaboration des critères (Komljenovic, Delourme, & Lavoie, 2019).

RÉFÉRENCES

- A. Côté, D. Messaoudi, D. Komljenovic, S. Alarie, O. Blancke, M. Gaha, ... Pelletier, S. (2019). Élaboration d'un système d'aide à la décision pour la gestion des actifs à TransÉnergie. Communication présentée au Congrès 2019 CIGRÉ Canada, Montreal.
- Alvarez, D. L., Rodriguez, D. F., Cardenas, A., da Silva, F. F., Leth Bak, C., García, R., & Rivera, S. (2021). Optimal Decision Making in Electrical Systems Using an Asset Risk Management Framework. *Energies*, 14(16), 4987.
- Amadi-Echendu, J., Willett, R., Brown, K., Hope, T., Lee, J., Mathew, J., ... Yang, B.-S. (2010). What Is Engineering Asset Management? Dans (Vol. 1, pp. 3-16). doi: 10.1007/978-1-84996-178-3_1
- Amadi-Echendu, J. E., & Mafutsana, J. M. (2016). A bibliographic review of trends in design and management of electrical power transmission transformers. Communication présentée au Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018435774&partnerID=40&md5=bcc218b220fe4e8623d2daf34851ad1c>
- Angell, D., & Ayers, L. M. (2013). Applicability of asset analytics, CBM and life cycle management to the smart grid: Balancing short-term and long-term risks. Communication présentée au CIGRE 2013 Lisbon Symposium - Smarts Grids: Next Generation Grids for Energy Trends. Repéré à

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048431578&partnerID=40&md5=f8f3d69361db18d197f3881458a75784>

Babar, M., Grela, J., Ozadowicz, A., Nguyen, P. H., Hanzelka, Z., & Kamphuis, I. G. (2017, 6-9 June 2017). Energy Flexometer: An effective implementation of Internet of Things for market-based demand response in an energy management system. Communication présentée au 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)

Baril, H. (2021). Hydro-Québec se débarrasse de ses divisions. La Presse. Repéré à <https://www.lapresse.ca/affaires/2021-02-24/hydro-quebec-se-debarrasse-de-ses-divisions.php>

Benani, S. (2023). Orienter la décision pour les plans d'adaptation liés aux changements climatique pour une compagnie productrice, distributrice et transporteuse d'électricité, mémoire de maîtrise, Département de génie industriel, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec.

Benson M.A., Rankin J.H.,(2016) Evaluating the sustainable performance of public infrastructure projects - Current review of methods, repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85030713013&partnerID=40&md5=10728020c6b5891b232795de586c48ae>

Bertola N.J., Cinelli M., Casset S., Corrente S., Smith I.F.C., (2019) A multi-criteria decision framework to support measurement-system design for bridge load testing. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85060285869&doi=10.1016%2fj.aei.2019.01.004&partnerID=40&md5=076e7ba3b18f6c2018dbaab021d23d5f>

Biard, G., & Abdul-Nour, G. (2021). Industry 4.0 Contribution to Asset Management in the Electrical Industry. *Sustainability*, 13(18), 10369.

Biard, G., & Abdul-Nour, G. (2022). Reliability Assessment of an Electrical Network with Digital Twins. *IFAC-PapersOnLine*, 55(19), 91-96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.189>

Biard, G., Abdul-Nour, G., Komljenovic, D., & Pelletier, S. (2022). Multi-criteria prioritization of asset management investments in the power industry. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1804-1809. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.660>

Biard, G., & Nour, G. A. (2023, 2023//). Methods for Comparing Asset Portfolio Reliability. Communication présentée au 16th WCEAM Proceedings, Cham.

Bosisio, A., Giustina, D. D., Fratti, S., Dedè, A., & Gozzi, S. (2019, 23-27 June 2019). A Metamodel for Multi-utilities Asset Management. Communication présentée au 2019 IEEE Milan PowerTech

Butans, J., & Orlovs, I. (2016). Diagnostics and Long Term Prognostics for Investment Decision Support in Smart Grids. *IFAC-PapersOnLine*, 49(28), 13-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.003>

Cahyo, W. N. (2017, 10-13 Dec. 2017). A modelling approach for maintenance resources-provisioning policies in a wind farm maintenance system. Communication présentée au 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)

Campelo F., Batista L.S., Takahashi R.H.C., Diniz H.E.P., Carrano E.G.,(2016) Multicriteria transformer asset management with maintenance and planning perspectives. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84974817825&doi=10.1049%2fiet-gtd.2015.1112&partnerID=40&md5=d1a1d6dbd0600a984c341bfc6aae7a79>

Catrinu, M. D., & Nordgård, D. E. (2010, 14-17 June 2010). Methodology for risk-informed maintenance and reinvestment decisions. Communication présentée au 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems

Catrinu, M. D., & Nordgård, D. E. (2011). Integrating risk analysis and multi-criteria decision support under uncertainty in electricity distribution system asset management. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(6), 663-670. doi: [10.1016/j.ress.2010.12.028](https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.028)

Cheah, P. H., Zhang, R., Gooi, H. B., Yu, H., & Foo, M. K. (2012, 12-14 Dec. 2012). Consumer energy portal and home energy management system for smart grid applications. Communication présentée au 2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)

Chen, Y., & Chiu, W. (2015, 27-30 Oct. 2015). A framework for a consumer-end energy management system in smart grid. Communication présentée au 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)

Chitpong, J., Suwanasri, C., & Suwanasri, T. (2016). Evaluation criteria for condition and importance assessment of high voltage transmission line. Communication présentée au 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2016. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84988850597&doi=10.1109%2fECTICon.2016.7561237&partnerID=40&md5=7089d83983599280a77438c8d9bcd7ad>

Cholette, M. E., Ma, L., Buckingham, L., Allahmanli, L., Bannister, A., & Xie, G. (2015). A decision support framework for prioritization of engineering asset management activities under uncertainty [Book Chapter]. Lecture Notes in Mechanical Engineering (Vol. 20, pp. 49-60). doi: 10.1007/978-3-319-15536-4_5 Repéré à https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84951965406&doi=10.1007%2f978-3-319-15536-4_5&partnerID=40&md5=ef5b6756f51e65ece731492ad12de78d

- Chong, A. K. W., Mohammed, A. H., Abdullah, M. N., & Rahman, M. S. A. (2019). Maintenance prioritization - a review on factors and methods. *Journal of Facilities Management*, 17, 18-39. doi: 10.1108/JFM-11-2017-0058
- Ciapessoni, E., Cirio, D., Pitto, A., Panteli, M., Van Harte, M., & Mak, C. (2019). Defining power system resilience.
- Clements, D., & Mancarella, P. (2018). Systemic modelling and integrated assessment of asset management strategies and staff constraints on distribution network reliability. *Electric Power Systems Research*, 155, 164-171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.029>.
- Cox, L. A., Jr. (2008). What's wrong with risk matrices? *Risk Anal*, 28(2), 497-512. doi: 10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x
- Da Costa, M. B., Dos Santos, L. M. A. L., Schaefer, J. L., Baierle, I. C., & Nara, E. O. B. (2019). Industry 4.0 technologies basic network identification. *Scientometrics*, 121(2), 977-994. doi: 10.1007/s11192-019-03216-7
- Da Silva Neves, A. J., & Camanho, R. (2015). The use of AHP for IT project prioritization - A case study for oil & gas Company. *Communication présentée au Procedia Computer Science*. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949211742&doi=10.1016%2fj.procs.2015.07.076&partnerID=40&md5=c39d94a8e2621a5bbcfb6ad8ead6ca52>

da Silva, R., Melani, A., Michalski, M., Souza, G., & Nabeta, S. (2019). Defining Maintenance Significant Items based on ISO 55000 and AHP: A Hydropower plant case study. Communication présentée au 29th European Safety and Reliability Conference, Hannover, Germany.

Dehghanian, P., Fotuhi-Firuzabad, M., Bagheri-Shouraki, S., & Kazemi, A. A. R. (2012). Critical Component Identification in Reliability Centered Asset Management of Power Distribution Systems Via Fuzzy AHP. *IEEE Systems Journal*, 6(4), 593-602. doi: 10.1109/JSYST.2011.2177134

Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of herrenberg, germany. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). doi: 10.3390/su12062307

Dezfuli, H., Stamatelatos, M., Maggio, G., Everett, C., & Youngblood, R. (2010). Risk-Informed Decision Making Handbook. Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100021361/downloads/20100021361.pdf>

Distribution, H.-Q. (2015). Demande d'autorisation des investissements 2016. : R-3933-2015.

dos Santos, R. S., & Vianna Lordelo, S. A. (2019). Internet of Things, Big Data and Simulation as a Competitive Advantage in the New Age of Industry 4.0.

Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering & Operations Management, 2686-2694.

Dragan Komljenovic, Georges Abdul-Nour, & Boudreau, J.-F. (2019). Risk-informed decision-making in asset management as a complex adaptive system of systems International Journal of Strategic Engineering Asset Management, 3(3).

Duijm, N. J. (2015). Recommendations on the use and design of risk matrices. Safety Science, 76, 21-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.014>

Elliott, M. A. (2010). Selecting numerical scales for pairwise comparisons. Reliability Engineering & System Safety, 95(7), 750-763. doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.02.013>

EPRI. (2006a). Electric Power Research Institute, Guideline for the Treatment of Uncertainty in Risk-Informed Applications: Applications Guide. Palo Alto, CA. Repéré à <https://www.epri.com/research/products/000000000001013491>

EPRI. (2006b). Guidelines for Power delivery Asset management. : EPRI.

EPRI. (2008). Treatment of Parameter and Model Uncertainty for Probabilistic Risk Assessments. Repéré à <https://www.epri.com/research/products/1016737>

- Erboz, G. (2017). How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0. Communication présentée au Managerial trends in the development of enterprises in globalization era, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/326557388_How_To_Define_Industry_40_Main_Pillars_Of_Industry_40
- Espie, P., Ault, G. W., & Burt, G. M. (2003). Multiple criteria decision making techniques applied to electricity distribution system planning. *IEE Proceedings -- Generation, Transmission & Distribution*, 150(5), 527-535. doi: 10.1049/ip-gtd:20030618
- Estebaranz Peláez, J. M., Nieto-Martin, J., & Butans, E. (2015). Assessing smart grid interventions for future power networks. Communication présentée au IET Conference Publications. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85008343690&partnerID=40&md5=ff8b2512062915c89c9557ec3fc15c51>
- Fleckenstein, M., & Balzer, G. (2014, 7-10 July 2014). Outage cost oriented maintenance strategies of outgoing feeders in transmission systems. Communication présentée au 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/document/6960606/>
- Franek, J., & Kresta, A. (2014). Judgment Scales and Consistency Measure in AHP. *Procedia Economics and Finance*, 12, 164-173. doi: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00332-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00332-3)

- Gaha, M., Chabane, B., Komljenovic, D., Côté, A., Hébert, C., Blancke, O., ... Abdunour, G. (2021). Global methodology for electrical utilities maintenance assessment based on risk-informed decision making. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16). doi: 10.3390/su13169091
- Garni, H. A., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137-150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Gharakheili, M. A., Fotuhi-Firuzabad, M., & Dehghanian, P. (2018). A New Multiattribute Decision Making Support Tool for Identifying Critical Components in Power Transmission Systems. *IEEE Systems Journal*, 12(1), 316-327. doi: 10.1109/JSYST.2015.2500262
- Gitelman, L. D., Kozhevnikov, M. V., & Kaplin, D. D. (2019). Asset management in grid companies using integrated diagnostic devices. *International Journal of Energy Production and Management*, 4(3), 230-243. doi: 10.2495/EQ-V4-N3-230-243
- Gómez, J. F., Fernández, P. M. G., Guillén, A. J., & Márquez, A. C. (2019). Risk-based criticality for network utilities asset management. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 16(2), 755-768. doi: 10.1109/TNSM.2019.2903985
- Goyal, R. K. (2020). IoT for Indian Power Sector [Conference Paper]. *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 580, pp. 191-197). doi: 10.1007/978-981-32-9119-

5_16 Repéré à https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077769272&doi=10.1007%2f978-981-32-9119-5_16&partnerID=40&md5=b971f006caf27baf1fa119c3e2b3316f

Gunarathna, P., & Hassan, R. (2016). Sustainability assessment tool for road transport asset management practice. *Road and Transport Research*, 25(4), 15-26.

Günel, K., & Ekti, A. R. (2019, 21-24 March 2019). Exploiting Machine Learning Applications for Smart Grids. Communication présentée au 2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)

Güngör-Demirci, G., Lee, J., Keck, J., Harrison, S. J., & Bates, G. (2019). Development of a risk-based tool for groundwater well rehabilitation and replacement decisions. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 68(6), 411-419. doi: 10.2166/aqua.2019.021

Gutiérrez, E. B., Santis, P. C., Martínez, N. J., & Villamizar, M. P. (2019). Model of indicators to strategically evaluate the management of R & D assets and prioritization with technique Analytic Hierarchy Process. *Espacios*, 40(3).

Ham, Y., & Kim, J. (2020). Participatory Sensing and Digital Twin City: Updating Virtual City Models for Enhanced Risk-Informed Decision-Making. *Journal of Management in Engineering*, 36(3). doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000748

- Hamad, A. A., & Ghunem, R. A. (2020). A Techno-Economic Framework for Replacing Aged XLPE Cables in the Distribution Network. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(5), 2387-2393. doi: 10.1109/TPWRD.2020.2967141
- Han, S., Hwang, H., Kim, S., Baek, G., & Park, J. (2015). Sustainable Water Infrastructure Asset Management: A Gap Analysis of Customer and Service Provider Perspectives. *Sustainability*, 7, 13334-13350. doi: 10.3390/su71013334
- Heck, G. J. v. (2008, 10-12 Nov. 2008). Asset management frameworks for (drinking water) infrastructures around the world: A (not exhaustive) overview of different initiatives and developments. Communication présentée au 2008 First International Conference on Infrastructure Systems and Services: Building Networks for a Brighter Future (INFRA)
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016, 5-8 Jan. 2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. Communication présentée au 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)
- Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Hou, L., Zhang, Y., Yu, Y., Shi, Y., & Liang, K. (2016, 20-21 Oct. 2016). Overview of Data Mining and Visual Analytics towards Big Data in Smart Grid. Communication

présentée au 2016 International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things (IIKI)

Hunt, A., Taylor, S., Morgan, M., & Lange, R. (2020). Modelling investment plans at asset portfolio level using optimum plan rationalisation approaches. Communication présentée au IFAC-PapersOnLine. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105574171&doi=10.1016%2fj.ifacol.2020.11.023&partnerID=40&md5=b9738e167e0219293af756363c8fde93>

Hussin, M. S., Al-Mehairi, M. S., & Al-Madhani, H. (2016, 23-24 Nov. 2016). DEWA distribution power asset management system in view of ISO 55000 Standard. Communication présentée au Asset Management Conference (AM 2016)

Hydro-Québec. (2012). Code de conduite du distributeur. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/a-propos/pdf/code-conduite-distributeur.pdf>

Hydro-Québec. (2019). Plan stratégique 2020-2024. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/plan-strategique.pdf?v=2020-02-24>

Hydro-Québec. (2021). L'éthique : au cœur de la culture d'entreprise. Repéré le 8 octobre, à <https://www.hydroquebec.com/a-propos/gouvernance/ethique.html>

Hydro-Québec. (2023). Plan d'action 2035. Vers un Québec décarboné et prospère.
Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/a-propos/pdf/plan-action-2035.pdf>

IAM. (2015). Asset Management – an anatomy.

Igroufa, M., Benzerra, A., & Seghir, A. (2020). Development of an assessment tool for infrastructure asset management of urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 82(3), 537-548. doi: 10.2166/wst.2020.356

Imani, M., & Ghassemian, H. (2018, 17-19 Dec. 2018). Electrical Load Forecasting Using Customers Clustering and Smart Meters in Internet of Things. Communication présentée au 2018 9th International Symposium on Telecommunications (IST)

Institute, B. S. (2008a). PAS55:2008-1:2008. Specification for the optimized management of physical assets. : BSI.

Institute, B. S. (2008b). PAS55:2008-2:2008. Guidelines for the application of PAS 55-1. : BSI.

IPWEA. (2015). IIMM Supplement 2015 Meeting ISO 55001 Requirements for Asset Management.

Islam, M. M., Lee, G., & Hettiwatte, S. N. (2017). Application of a general regression neural network for health index calculation of power transformers. *International*

Journal of Electrical Power and Energy Systems, 93, 308-315. doi:
10.1016/j.ijepes.2017.06.008

ISO. (2014a). ISO 55000:2014 Gestion d'actifs — Aperçu général, principes et terminologie. : ISO.

ISO. (2014b). ISO 55001:2014 Gestion d'actifs — Systèmes de management — Exigences.

ISO. (2014c). ISO 55002:2014 Gestion d'actifs — Systèmes de management — Lignes directrices relatives à l'application de l'ISO 55001. : ISO.

ISO. (2023). ISO/TS 31050 Risk management — Guidelines for managing an emerging risk to enhance resilience.

Jeromin, I., Birkner, P., Balzer, G., & Asgarieh, L. (2013, 10-13 June 213). Multi-criteria optimization of maintenance activities. Communication présentée au 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)

Jiang, Z., Lv, H., Li, Y., & Guo, Y. (2021). A novel application architecture of digital twin in smart grid. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. doi:
10.1007/s12652-021-03329-z

Johnson, A., Strachan, S., & Ault, G. (2012a). A framework for asset replacement and investment planning in power distribution networks. Communication présentée au IET Conference Publications. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879645341&doi=10.1049%2fcp.2012.1901&partnerID=40&md5=4bca76a80fed4bf5bca8ae45b2c282f8>

Johnson, A., Strachan, S., & Ault, G. (2012b, 27-28 Nov. 2012). A framework for asset replacement and investment planning in power distribution networks. Communication présentée au IET & IAM Asset Management Conference 2012

Julien, N., & Martin, E. (2020). Le Jumeau numérique : de l'intelligence artificielle à l'industrie agile. Dunod.

Kalutara, P., Zhang, G., Setunge, S., Wakefield, R., & Mohseni, H. (2014). A proposed decision-making model to prioritize building elements maintenance actions toward achieving sustainability in community buildings in Australia [Book Chapter]. Lecture Notes in Mechanical Engineering (Vol. 9, pp. 139-151). doi: 10.1007/978-1-4471-4993-4_13 Repéré à https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84951125454&doi=10.1007%2f978-1-4471-4993-4_13&partnerID=40&md5=e772974cf5f960828e0b775364e49a53

Karamouz, M., Movahhed, M., & Elyasi, A. H. (2022). Financial allocation and network recovery for interdependent wastewater treatment infrastructure: development of

resilience metrics. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-27. doi: 10.1080/23789689.2022.2148447

Katina, P., Pyne, J., Keating, C., & Komljenovic, D. (2021). Complex System Governance as a Framework for Asset Management. *Sustainability*, 13 (15), 1-17. doi: 10.3390/su13158502

Khaliq, S. A., Mahmood, M. N., & Das, N. (2015, 15-18 Nov. 2015). Towards a best practice asset management framework for electrical power distribution organisations. Communication présentée au 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)

Khalyasmaa, A. I., & Dmitriev, S. A. (2015). Expert system for engineering assets' management of utility companies. Communication présentée au Proceedings - SDEMPED 2015: IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959288567&doi=10.1109%2fDEMPED.2015.7303724&partnerID=40&md5=ff715c53de198f352a7864e79d6f2afc>

Kifokeris, D., Matos, J., Xenidis, Y., & Bragança, L. (2018). Bridge Quality Appraisal Methodology: Application in a Reinforced Concrete Overpass Roadway Bridge. *Journal of Infrastructure Systems*, 24. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000455

Kiran, D. R. (2019) 34. Industry 4.0. Dans Production Planning and Control - A Comprehensive Approach : Elsevier. Repéré à <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122SZKC/production-planning-control/industry-4-conclusion>

Kiran, D. R. (2019) 35. Internet of Things. Dans Production Planning and Control - A Comprehensive Approach : Elsevier. Repéré à <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122SZN2/production-planning-control/origin-internet-things>

Koksal, A., Ozdemir, A., & Ata, O. (2017). RCAM based maintenance plan of the power transformers using k-means clustering algorithm. Communication présentée au 2017 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, ISAP 2017. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85039949285&doi=10.1109%2fISAP.2017.8071391&partnerID=40&md5=a4dbbe0894bcd5750bc94e94b0126063>

Komljenovic, Dragan. (2008). An analysis to determine industry's preferred option for an initial generic reliability database for candu. 10.13140/2.1.2647.9360

Komljenovic, D., Delourme, B., & Lavoie, M. (2019). Ice storm Canada-Extreme weather conditions.

Koziel, S., Hilber, P., & Ichise, R. (2019). Application of big data analytics to support power networks and their transition towards smart grids. Communication présentée au Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2019. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081360970&doi=10.1109%2fBigData47090.2019.9005479&partnerID=40&md5=6b7817de51fb9b9397ce436e27d3dcbc>

Koziel, S., Hilber, P., & Ichise, R. (2020). A review of data-driven and probabilistic algorithms for detection purposes in local power systems. Communication présentée au 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2020 - Proceedings. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091343794&doi=10.1109%2fPMAPS47429.2020.9183634&partnerID=40&md5=f0b87d15738db8e6f3a4167c16d04ce4>

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

- Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP*, 16, 3-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- Leeuwen, D. v. (2011, 30 Nov.-1 Dec. 2011). Building an Asset Management organization from zero base to going concern in 2.5 years — Case study. Communication présentée au IET and IAM Asset Management Conference 2011
- Liang, F., & Brunelli, M. (2019). Consistency Issues in the Best Worst Method: Measurements and Thresholds. *Omega*, 96, 102175. doi: [10.1016/j.omega.2019.102175](https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102175)
- Liang, F., Brunelli, M., & Rezaei, J. (2020). Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. *Omega*, 96, 102175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102175>
- Ling, J., Germain, E., Murphy, R., & Saroj, D. (2021). Designing a sustainability assessment tool for selecting sustainable wastewater treatment technologies in corporate asset decisions. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7). doi: [10.3390/su13073831](https://doi.org/10.3390/su13073831)
- Liu, T., Yu, H., Yin, H., Zhang, Z., Sui, Z., Zhu, D., ... Li, Z. (2021, 8-11 April 2021). Research and Application of Digital Twin Technology in Power Grid Development Business. Communication présentée au 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)

Loi modifiant la Loi sur la Régie de l'énergie et d'autres dispositions législatives, (2000).

Repéré

Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

Lucio, J. C. M., & Teive, R. C. G. (2007, 1-5 July 2007). Fuzzy Causal Maps for Asset Management: An Approach for Problem-Structuring and Multi-Criteria Evaluation in Electrical Utilities. Communication présentée au 2007 IEEE Lausanne Power Tech

Luo, F., Dong, Z. Y., Zhao, J., Zhang, X., Kong, W., & Chen, Y. (2015, 26-30 July 2015). Enabling the big data analysis in the smart grid. Communication présentée au 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting

Mahmood, I., Kausar, T., Sarjoughian, H. S., Malik, A. W., & Riaz, N. (2019). An Integrated Modeling, Simulation and Analysis Framework for Engineering Complex Systems. *IEEE Access*, 7, 67497-67514. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2917652](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917652)

Mamun, K. A., & Islam, F. R. (2016). Reliability evaluation of power network: A case study of Fiji Islands. Communication présentée au Proceedings of the 2016

Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2016. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006789621&doi=10.1109%2fAUPEC.2016.7749359&partnerID=40&md5=ac7d0309c50b127eea533fd8b9de73c1>

Manninen, H., Kilter, J., & Landsberg, M. (2022). A holistic risk-based maintenance methodology for transmission overhead lines using tower specific health indices and value of loss load. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107767>

Marlen, A., Maxim, A., Ukaegbu, I. A., & Nunna, H. S. V. S. K. (2019, 17-20 Feb. 2019). Application of Big Data in Smart Grids: Energy Analytics. Communication présentée au 2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)

Marlow, D. R., Beale, D. J., & Mashford, J. S. (2012). Risk-based prioritization and its application to inspection of valves in the water sector. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 100, 67-74. doi: [10.1016/j.ress.2011.12.014](https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.014)

Masukume, M., Mhlanga, S., & Mubvirwi, T. (2020). Development Of An Asset Criticality Assessment Tool, The Case Of A Fertiliser Manufacturing Company. Communication présentée au 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Harare, Zimbabwe.

Mattioli, J., Perico, P., & Robic, P. (2020). Artificial Intelligence based Asset Management. Communication présentée au 2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE), Budapest, Hungary.

Michelle S. Dojutrek, S. L., J. Eric Dietz. (2016). A multi-criteria methodology for measuring the resilience of transportation assets. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 7(3), 290-301.

Minnaard, H. (2013, 27-28 Nov. 2013). Stork technical services: Asset reliability & integrity management model. Communication présentée au IET IAM Asset Management Conference 2013

Moharm, K. (2019). State of the art in big data applications in microgrid: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 42. doi: 10.1016/j.aei.2019.100945

Mohsenian-Rad, A., & Leon-Garcia, A. (2010, 4-6 Oct. 2010). Coordination of Cloud Computing and Smart Power Grids. Communication présentée au 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications

Morad, M., Abdellah, E. B., & Ahmed, E. K. (2013, 28-30 Oct. 2013). Towards a strategy of optimization the maintenance activities of the MV/LV PDS transformers. Communication présentée au Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)

Moradi, J., Shahinzadeh, H., Nafisi, H., Marzband, M., & Gharehpetian, G. B. (2019, 31 Dec.-1 Jan. 2020). Attributes of Big Data Analytics for Data-Driven Decision Making in Cyber-Physical Power Systems. Communication présentée au 2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS). Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/document/9069391/>

Nakayama, R. S., de Mesquita Spínola, M., & Silva, J. R. (2020). Towards I4.0: A comprehensive analysis of evolution from I3.0. *Computers & Industrial Engineering*, 144, 106453. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106453>

National Academies of Sciences, E., & Medicine. (2017). *Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: [doi:10.17226/24836](https://doi.org/10.17226/24836). Repéré à <https://www.nap.edu/catalog/24836/enhancing-the-resilience-of-the-nations-electricity-system>

Pan, H., Dou, Z., Cai, Y., Li, W., Lei, X., & Han, D. (2020). Digital Twin and Its Application in Power System. Communication présentée au 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy, ICPRE 2020. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096668699&doi=10.1109%2fICPRE51194.2020.9233278&partnerID=40&md5=2b76bdeabff1828c2bb824c82cedea6>

Paya, A., & Marinescu, D. C. (2014, 19-23 May 2014). Cloud-Based Simulation of a Smart Power Grid. Communication présentée au 2014 IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium Workshops

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

Ramakrishnan, R., & Gaur, L. (2016, 22-24 Jan. 2016). Smart electricity distribution in residential areas: Internet of Things (IoT) based advanced metering infrastructure and cloud analytics. Communication présentée au 2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA)

Rashid, M. H. (2018, 1-3 Aug. 2018). AMI Smart Meter Big Data Analytics for Time Series of Electricity Consumption. Communication présentée au 2018 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/ 12th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE). Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/document/8456135/>

Rezaei, J. BWM Solvers [Web page]. Repéré le Octobre, à <https://bestworstmethod.com/software/>

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>

Rhein, A., Balzer, G., Boya, R., & Eichler, C. (2016, 16-20 Oct. 2016). Multi-criteria optimization of maintenance and replacement strategies in transmission systems. Communication présentée au 2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)

Rivera, W., & Rodriguez-Martinez, M. (2016, 28 Nov.-1 Dec. 2016). Towards cloud services in smart power grid. Communication présentée au 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)

Rivest, R. (2019). Techniques de simulation pour la recherche sur le perfectionnement de la méthode AHP. HEC Montréal, Montréal. Repéré à <http://biblos.hec.ca/biblio/memoires/m2019a612764.pdf>

Rosato, A., Succetti, F., Araneo, R., Andreotti, A., Mitolo, M., & Panella, M. (2020, 29 June-28 July 2020). A Combined Deep Learning Approach for Time Series Prediction in Energy Environments. Communication présentée au 2020 IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/document/9176818/>

Rozuhan, H., Muhammad, M., & Niazi, U. M. (2020). Probabilistic risk assessment of offshore installation hydrocarbon releases leading to fire and explosion, incorporating system and human reliability analysis. *Applied Ocean Research*, 101. doi: 10.1016/j.apor.2020.102282

- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176. doi: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1994). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Interfaces*, 24(6), 19-43.
- Sanchez, A., & Rivera, W. (2017, 25-30 June 2017). Big Data Analysis and Visualization for the Smart Grid. Communication présentée au 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)
- Schluse, M., Atorf, L., & Rossmann, J. (2017). Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development. Communication présentée au 11th Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2017 - Proceedings. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85021452617&doi=10.1109%2fSYSCON.2017.7934796&partnerID=40&md5=ac42cb7cb309868d006f843dae335cd9>
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M., & Lienert, J. (2014). Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*, 49, 124-143. doi: 10.1016/j.watres.2013.11.017
- Seddari, N. (2015). Outils formels et opérationnels pour la modélisation et la simulation des systèmes complexes.

Shah, S. W. A., Mahmood, M. N., & Das, N. (2016, 25-28 Sept. 2016). Strategic asset management framework for the improvement of large scale PV power plants in Australia. Communication présentée au 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)

Shahid, M. A., Mahamood, M. N., & Das, N. (2016, 25-28 Sept. 2016). Integrated asset management framework for Australian wind farms. Communication présentée au 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)

Sivapragash, C., Thilaga, S. R., & Kumar, S. S. (2012, 27-29 Dec. 2012). Advanced cloud computing in smart power grid. Communication présentée au IET Chennai 3rd International on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2012)

Soares, B. N., Abaide, A. d. R., & Bernardon, D. (2014, 2-5 Sept. 2014). Methodology for prioritizing investments in distribution networks electricity focusing on operational efficiency and regulatory aspects. Communication présentée au 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)

Stimmel, C. L. (2016). Big data analytics strategies for the smart grid. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051581509&partnerID=40&md5=dc79edb10522aecc777d8fe26eb6c249>

Suryani, E., Hendrawan, R. A., Faster, E. A. P., & Dewi, L. P. (2015). A simulation model for strategic planning in asset management of electricity distribution network [Conference Paper]. *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 516, pp. 481-492). doi: 10.1007/978-3-662-46742-8_44 Repéré à https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84930443853&doi=10.1007%2f978-3-662-46742-8_44&partnerID=40&md5=ca4757720a60836ea8d240e086e8bd30

Suwanasri, T., Phadungthin, R., & Suwanasri, C. (2014). Risk-based maintenance for asset management of power transformer: practical experience in Thailand. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24, 1103-1119. doi: 10.1002/etep.1764

Syed, Z., & Lawryshyn, Y. (2020). Multi-criteria decision-making considering risk and uncertainty in physical asset management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65, 104064. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104064>

Tanaka, H., Tsukao, S., Yamashita, D., Niimura, T., & Yokoyama, R. (2010). Multiple Criteria Assessment of Substation Conditions by Pair-Wise Comparison of Analytic Hierarchy Process. *IEEE transactions on power delivery*, 25(4). doi: 10.1109/TPWRD.2010.2048437

Tang, L., Huang, X., Zhang, C., He, X., Zhu, T., Gu, L., & Wan, Y. (2021). Health assessment and fault diagnosis of substation equipment based on digital twin. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85118439337&doi=10.1088%2f1742-
6596%2f2030%2f1%2f012094&partnerID=40&md5=2130c7b35d2da342237952b
7a991efb2

Tlili, Y., & Nafi, A. (2012). A practical decision scheme for the prioritization of water pipe replacement. *Water Science & Technology: Water Supply*, 12, 895. doi: 10.2166/ws.2012.068

Tlili, Y., & Nafi, A. (2012). A practical scheme for building and assessment of water pipe renewal policies. Communication présentée au 14th Water Distribution Systems Analysis Conference 2012, WDSA 2012. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84883084379&partnerID=40&md5=7db956d9f49f6bdbcc11341e840f8923>

TransÉnergie, H.-Q. (2008). Stratégie de gestion de la pérennité des actifs du transporteur. : R-3670-2008.

TransÉnergie, H.-Q. (2016). Description synthétique des investissements et de leurs objectifs. : R-3982-2016.

Tscheikner-Gratl, F., Egger, P., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2017). Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods for Integrated Rehabilitation Prioritization. *Water*, 9(2), 68.

Udie, J., Bhattacharyya, S., & Ozawa-Meida, L. (2018). A Conceptual Framework for Vulnerability Assessment of Climate Change Impact on Critical Oil and Gas Infrastructure in the Niger Delta. *Climate*, 6(1), 11.

US Nuclear Regulatory Commission, (2003), Formal Methods of Decision Analysis Applied to Prioritization of Research and Other Topics – NUREG/CR-6833, Washington, DC 20555-0001.

Vermeer, M., Wetzter, J., Wielen, P. v. d., Haan, E. d., & Meulemeester, E. d. (2015, 29 June-2 July 2015). Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model. Communication présentée au 2015 IEEE Eindhoven PowerTech

VGQ. (2022). Rapport du Vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale pour l'année 2022-2023. Repéré à https://www.vgq.qc.ca/Fichiers/Publications/rapport-annuel/189/vgq_dec2022_complet_web.pdf

Wan, Q., Yu, Y., Wu, K., Li, J., & Liu, W. (2019, 11-14 Aug. 2019). Statistics and Analysis of Power Consumption Data Based on Big Data. Communication présentée au 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)

Wei, Q., Ma, R., Wang, Y., Chen, M., Sun, Y., Liu, M., & Lin, X. (2020, 28-30 July 2020). GLAD: A Method of Microgrid Anomaly Detection Based on ESD in Smart Power Grid. Communication présentée au 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)

Wheeldon, M. J., & Hayes, J. (2012, 27-28 Nov. 2012). Developing a whole company culture of asset management through organisational structure, an asset management framework and a risk based approach for asset intervention. Communication présentée au IET & IAM Asset Management Conference 2012

Wijnia, Y. C. (2009, 9-11 Dec. 2009). Asset management for infrastructures in fast developing countries. Communication présentée au 2009 Second International Conference on Infrastructure Systems and Services: Developing 21st Century Infrastructure Networks (INFRA)

Wortmann, A., Barais, O., Combemale, B., & Wimmer, M. (2020). Modeling Languages in Industry 4.0: An Extended Systematic Mapping Study. *Software and Systems Modeling*, 19. doi: 10.1007/s10270-019-00757-6

Wu, Z. (2020). A comparative study on decision-making methodology. Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières.

Wu, Z., & Abdul-Nour, G. (2020). Comparison of Multi-Criteria Group Decision-Making Methods for Urban Sewer Network Plan Selection. *CivilEng*, 1(1), 26-48.

Xu, Q., Jia, X., & He, L. (2010, 1-3 Aug. 2010). The control of Distributed Generation System using Multi-Agent System. Communication présentée au 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering

Yan, J., Meng, Y., Lu, L., & Li, L. (2017). Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance. *IEEE Access*, 5, 23484-23491. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2765544

Yilmaz, S. E. (2020). Overcoming the technology myopia of Industry 4.0: To be effective, IoT automation must be based on a business strategy. *ISE: Industrial & Systems Engineering at Work*, 52(9), 42-45.

Yun, Z., Junjie, L., Ji, C., & Hua, W. (2017, 26-28 Nov. 2017). A framework research of power distribution equipment condition monitoring cloud platform based on RESTful web service. Communication présentée au 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)

Zareifar, A., Zartabi, H., & Ouraei, Z. (2019, 30 April-2 May 2019). Internet of Things Benefits on Smart Grid. Communication présentée au 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/document/8786678/>

Zhang, Y., Huang, T., & Bompard, E. (2018). Big data analytics in smart grids: a review. *Energy Informatics*, 1, 1-24. doi: 10.1186/s42162-018-0007-5

Zhichun, Y., Zilin, W., Yu, S., Fan, Y., Yang, L., Lei, S., & Fangyi, C. (2019, 21-24 May 2019). Study of Intelligent Inspection for Distribution Network Based on Internet of

Things. Communication présentée au 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)

Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 215-225. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.050

Zio, E. (2016). Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 152, 137-150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.009>

Zio, E., & Pedroni, N. (2012). Risk-informed decision-making processes: an overview. *Cahiers de la Sécurité Industrielle*, 2012-10.

Zolin, D. S., & Ryzhkova, E. N. (2020). Digital Twins for Electric Grids. Communication présentée au Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85093953560&doi=10.1109%2fRusAutoCon49822.2020.9208080&partnerID=40&md5=b817d0f89b0c82dbc305994755535d6d>

Zou, Q., Qin, L., & Ma, Q. (2012). The application of the Internet of Things in the smart grid [Conference Paper]. *Advanced Materials Research* (Vol. 433-440, pp. 3388-3394). doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.3388 Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

84856038369&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fAMR.433-
440.3388&partnerID=40&md5=f8353266d0144e4ef63e87c97f956823

ANNEXE A. MODÈLES DE GESTION DES ACTIFS COMPARÉS

Dans le but de comparer les modèles proposés par la littérature par rapport à celui de la PAS-55, une liste des éléments principaux de la norme est établie. Les éléments listés ne sont pas une liste exhaustive des éléments recommandés par la spécification. Ils forment cependant une base de comparaison pour les modèles étudiés. Chacun des modèles est donc évalué de manière à identifier s'il couvre les éléments identifiés. Le Tableau 21 présente le résultat de la comparaison.

Tableau 21 Comparaison des éléments clés des modèles de gestion des actifs

Éléments clés	PAS-55 (Institute, 2008a, 2008b)	ISO-55000(ISO, 2014a, 2014b, 2014c)	M. A. Shahid (Shahid et al., 2016)	M. S. Hussin (Hussin et al., 2016)	J. Mattioli (Mattioli et al., 2020)	D. van Leeuwen (Leeuwen, 2011)	M. J. Wheelton (Wheelton & Hayes, 2012)	S. A. Khaliq (Khaliq et al., 2015)	S. W. A. Shah (Shah et al., 2016)	EPRI (EPRI, 2006b)	Proportion (%)
	Plans et objectifs de l'organisation	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Politique de gestion des actifs	x	x		x		x	x	x	x	x	80
Plans stratégiques de gestion des actifs	x	x	x	x	x	x			x	x	90
Objectifs de gestion des actifs	x	x		x					x	x	50
Définition du portefeuille d'actifs	x	x		x	x	x			x	x	70
Plans de gestion des actifs	x	x	x	x	x	x	x	x			90

Éléments clés	Bibliographie										Proportion (%)
	PAS-55 (Institute, 2008a, 2008b)	ISO-55000(ISO, 2014a, 2014b, 2014c)	M. A. Shahid (Shahid et al., 2016)	M. S. Hussin (Hussin et al., 2016)	J. Mattioli (Mattioli et al., 2020)	D. van Leeuwen (Leeuwen, 2011)	M. J. Wheeldon (Wheeldon & Hayes, 2012)	S. A. Khaliq (Khaliq et al., 2015)	S. W. A. Shah (Shah et al., 2016)	EPRI (EPRI, 2006b)	
Acquisition	x		x	x	x	x		x	x		70
Opérations	x		x	x	x			x	x		60
Maintenance	x		x	x	x			x	x		60
Disposition	x		x	x	x			x	x		60
Gestion du risque	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
Mise en œuvre des plans de gestion des actifs	x	x		x	x	x		x	x	x	80
Gestion des urgences et des plans de contingence	x						x	x			30
Évaluation de la performance et amélioration continue	x	x	x	x		x	x	x	x	x	90
Besoins et attentes des parties prenantes	x	x	x	x					x	x	60
Leadership et engagement de l'organisation envers la gestion des actifs	x	x		x				x		x	50

Éléments clés	Bibliographie										
	PAS-55 (Institute, 2008a, 2008b)	ISO-55000(ISO, 2014a, 2014b, 2014c)	M. A. Shahid (Shahid et al., 2016)	M. S. Hussin (Hussin et al., 2016)	J. Mattioli (Mattioli et al., 2020)	D. van Leeuwen (Leeuwen, 2011)	M. J. Wheeldon (Wheeldon & Hayes, 2012)	S. A. Khaliq (Khaliq et al., 2015)	S. W. A. Shah (Shah et al., 2016)	EPRI (EPRI, 2006b)	Proportion (%)
Définition des rôles et responsabilités	x	x		x		x				x	50
Gestion des ressources humaines, financières et matérielles	x	x		x	x		x	x	x		70
Gestion des compétences	x	x		x	x		x				50
Communication	x	x		x							30
Gestion des informations	x	x		x	x	x		x	x	x	80
Gestion des externalisations	x	x		x		x					40
Proportion (%)		77	45	95	59	55	41	64	73	55	

ANNEXE B. ÉTAPES DE RÉALISATION DE LA MÉTHODE AHP

La méthode AHP est largement utilisée depuis son élaboration par Thomas L. Saaty (Chong et al., 2019). Les étapes de réalisation de l'AHP sont les suivantes (da Silva et al., 2019; R. W. Saaty, 1987; T. L. Saaty, 1994; Soares et al., 2014). L'AHP peut être réalisé avec l'aide d'outils informatiques et de logiciels.

La présente section décrit une méthode réalisée avec Excel ou un logiciel de calcul simple.

1 Structurer la hiérarchie du problème

Cette étape consiste à décomposer l'objectif global en de multiples critères, qui répondent à cet objectif (voir Figure 19). Le niveau inférieur représente les alternatives (projets d'investissements) à prioriser.

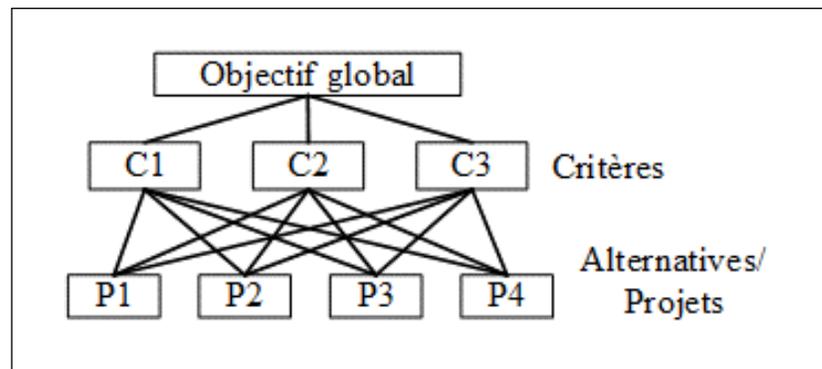


Figure 19 Structure de la hiérarchie du problème avec la méthode AHP

2 Comparaison par paire des éléments de chaque couche hiérarchique

Une matrice de comparaison (voir Tableau 22) est utilisée pour identifier la contribution d'un critère par rapport à un autre pour l'atteinte de l'objectif global

Tableau 22 Comparaison en paire de la contribution des critères sur l'objectif global

	C1	C2	C3
C1	1	Contribution de C1 vs C2	Contribution de C1 vs C3
C2	Inverse	1	Contribution de C2 vs C3
C3	Inverse	Inverse	1

Une même matrice est utilisée pour comparer la contribution d'une alternative par rapport à un autre sur l'atteinte d'un critère.

Tableau 23 Comparaison en paire de la contribution des projets pour le critère *i*

	P1	P2	P3	P4
P1	1	Contribution P1 vs P2	Contribution P1 vs P3	Contribution P1 vs P4
P2	Inverse	1	Contribution P2 vs P3	Contribution P2 vs P4
P3	Inverse	Inverse	1	Contribution P3 vs P4
P4	Inverse	Inverse	Inverse	1

L'échelle utilisée pour la comparaison est celle définie par l'auteur (R. W. Saaty, 1987). Les graduations paires (2,4,6,8) représentent une évaluation de la préférence se situant entre deux graduations impaires.

1. Contribution (importance) égale d'un projet ou critère par rapport à un autre.
2. Légèrement préférable
3. Fortement préférable
4. Très fortement préférable
5. Extrêmement (ou totalement) préférable

Dans le contexte de la recherche, on s'arrête à la comparaison des critères sur l'objectif global. La comparaison des alternatives (des projets) n'est pas applicable au contexte de priorisation des projets d'investissements dans des portefeuilles d'actifs de multiple catégorie, car la durée de la réalisation de la méthode serait irréaliste.

3 Calcul du vecteur de priorité

Une fois les évaluations des préférences réalisées, les vecteurs de priorité (vecteur propre normalisé) de chaque matrice de comparaison sont générés. Ce vecteur représente le poids de chaque élément d'un niveau de la structure par rapport à l'élément hiérarchique supérieur. Le vecteur de priorité V est obtenu par la méthode suivante :

$$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n}$$

Où

a_{ij} est la valeur normalisée de l'évaluation du critère i par rapport à j

n est le nombre de critères comparés

4 Évaluation de la cohérence des évaluations par paires

Pour évaluer la cohérence, on doit d'abord diviser le vecteur de priorité par le vecteur de somme pondérée. Le vecteur de somme pondérée définie par le produit de chaque colonne de la matrice de comparaison et le poids du critère correspondant. Le ratio de cohérence (CR) compare l'indice de cohérence aléatoire des matrices (RI) à l'indice de cohérence (CI : consistency index). Le CR ne doit pas dépasser 10% (R. W. Saaty, 1987).

Tableau 24 Indice de cohérence aléatoire

Nombre de critères	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

On peut alors appliquer les équations suivantes :

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Où

λ est valeur moyenne du vecteur de priorité divisé par le vecteur de somme pondérée

n est le nombre de critères comparés

ANNEXE C. ÉTAPES DE RÉALISATION DE LA MÉTHODE BWM

La méthode BWM a été développée par Jafar Rezaei en 2015. Avec cette méthode, les critères sont comparés par paire par rapport au meilleur et au pire critère. Ces deux critères polarisés sont établis préalablement par les décideurs.

La méthode BWM propose également un ratio afin de valider la cohérence des résultats (Rezaei, 2015). Les étapes de réalisation sont les suivantes :

1. Structurer la hiérarchie du problème

Cette étape consiste à décomposer l'objectif global en de multiples critères, qui répondent à cet objectif (voir Figure 19). Le niveau inférieur représente les alternatives (projets d'investissements) à prioriser.

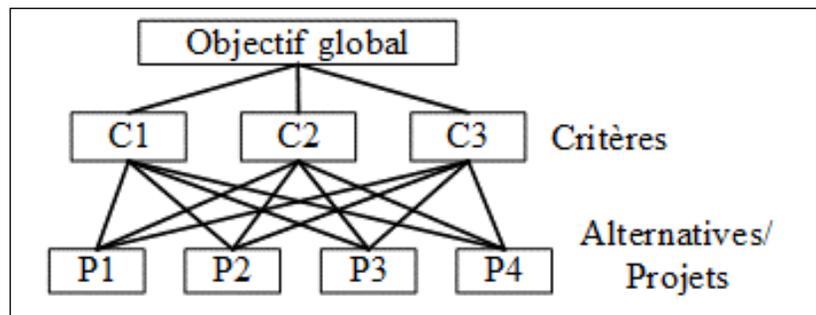


Figure 20 Structure de la hiérarchie du problème avec la méthode BWM

2. Identifier le meilleur et le pire critère

Les décideurs doivent atteindre un consensus sur le meilleur ou le pire critère. Cette étape peut être réalisée avec la méthode Delphi.

3. Comparer par paire les autres critères en fonction du meilleur et du pire critère

Pour cette étape, une matrice de comparaison est utilisée pour identifier la contribution d'un critère par rapport à un autre pour l'atteinte de l'objectif global (voir Tableau 25).

Tableau 25 Comparaison en paire de la contribution du pire et du meilleur critère sur l'objectif global

	C1	C2	Cn
Meilleur critère	Meilleur critère vs C1	Meilleur critère vs C2	Meilleur critère vs Cn
Pire critère	Pire critère vs C1	Pire critère vs C2	Pire critère vs Cn

L'échelle proposée par l'auteur est similaire à l'échelle de l'AHP. Les graduations paires (2,4,6,8) représentent une évaluation de la préférence se situant entre deux graduations impaires.

1. Contribution (importance) égale d'un projet par rapport à un autre ou d'un critère par rapport à un autre.
2. Légèrement préférable
3. Fortement préférable
4. Très fortement préférable
5. Extrêmement (ou totalement) préférable

D'autres types d'échelles peuvent toutefois être utilisées. Ainsi, dans le contexte de la recherche, les mêmes échelles seront utilisées pour l'évaluation des critères. Encore une fois, on s'arrête à la comparaison des critères sur l'objectif global. La comparaison des alternatives (des projets) n'est pas applicable au contexte de priorisation des projets d'investissements dans des portefeuilles d'actifs de multiple catégorie, car la durée de la réalisation de la méthode serait irréaliste.

4. Calcul du vecteur de priorité

Le vecteur de priorité est obtenu par un modèle d'optimisation linéaire qui tend à maximiser les différences absolues du ratio du poids du meilleur et du pire critère indépendamment par rapport au poids du critère évalué et l'évaluation par paire du critère par rapport à ces deux critères polarisants. Le modèle d'optimisation est soumis à la contrainte que la somme des poids doit être équivalente à 1 et tous supérieurs ou égaux à 0. Le calcul du vecteur de priorité est aidé par l'utilisation du solveur Excel (Rezaei).

5. Évaluation de la cohérence des évaluations par paires

L'évaluation de l'indice de cohérence est similaire à la méthode AHP. C'est-à-dire qu'un ratio de cohérence (CR) compare l'indice de cohérence maximal des matrices (CM) à l'indice de cohérence (CI). On peut alors appliquer l'équation suivante :

$$CR = \frac{CI}{CM}$$

L'utilisation du solveur facilite l'évaluation de l'indice de cohérence. Le ratio de cohérence correspond à une valeur entre 0 et 1. Plus la valeur est près de 0, meilleure est la cohérence des résultats (Liang, Brunelli, & Rezaei, 2020). Le solveur (Rezaei) indique aussi un ratio maximal en fonction du nombre de critères utilisés

Tableau 26 Indice de cohérence maximal (CM)

Nombre de critères	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47

ANNEXE D. QUESTIONNAIRE DE RÉPONSE POUR LA COLLECTE DE DONNÉES

Identification du répondant
Nom:
Poste:
Unité:
Direction principale:

1. Évaluer par paire le niveau d'importance des éléments de comparaison des activités de gestion des actifs pour atteindre les objectifs de l'entreprise

Tableau 27 Échelles d'évaluation à utiliser

Échelle	Interprétation	Inverse
1	Importance égale	1/5
3	Un peu plus important	1/3
5	Plus important	1/5
7	Beaucoup plus important	1/7
9	Incontestablement plus important	1/9

Quel est le meilleur (+ important) et le pire (- important) critère? un seul X par ligne

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Le plus important (X)							
Le moins important (X)							

Évaluer par paire le meilleur et le pire critère par rapport aux autres

Critères ↓ est ± important que → (si moins important, inscrire l'inverse)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Le plus important							
Le moins important							

Comparer par paire tous les critères

Critères ↓ est ± important que → (si moins important, l'inverse) inscrire							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1						
C2		1					
C3			1				
C4				1			
C5					1		
C6						1	
C7							1

ANNEXE E. ÉCHELLES D'ÉVALUATION DES CRITÈRES

Confidentielle