

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉVÈNEMENTS RARES ET GESTION DES ACTIFS EN CONTEXTE D'HYDRO-  
QUÉBEC: PRISE DE DÉCISON SOUS RISQUE, INCERTITUDE ET RÉSILIENCE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE  
(CONCENTRATION EN GÉNIE INDUSTRIEL)

PAR  
IBRAHIMA DIALLO

MAI 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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 ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

### Ce mémoire a été dirigé par :

François Gauthier, Ph.D. Directeur, École d'ingénierie Directeur de recherche	Université du Québec à Trois-Rivières
Georges Abdul-Nour, Ph.D. Professeur, Département de génie industriel Codirecteur de recherche	Université du Québec à Trois-Rivières

### Jury d'évaluation du mémoire :

François Gauthier	UQTR
Prénom et nom Grade	Rattachement institutionnel
Chantal Baril	UQTR
Prénom et nom Grade	Rattachement institutionnel
Amira Dems	IREQ\HQ
Prénom et nom Grade	Rattachement institutionnel

## DÉDICACE

Je dédie ce travail :

- à ma très chère mère, Hapsatou Sow qui m'a transmis ces valeurs qui sauront toujours me guider. Parmi celles-ci, la patience et aussi d'avoir constamment le cœur ouvert. Merci pour ton amour et tes affections;
- à mon très cher père, Adama DIALLO qui m'a permis d'avoir une bonne éducation. Merci pour ton amour et tes affections;
- à mes bien-aimé.e.s frères et sœurs; Oumar (Barou), Houssein (Vétéran), Defa (Coumbeu) et Mariétou (Yetounna), pour leur soutien à ma réussite et leur amour;
- à « MAS » pour ton soutien et tes conseils tout au long de ce mémoire;
- à toutes les personnes physiques ou morales pour qui ce modeste travail pourrait être utile.

## REMERCIEMENTS

Je remercie vivement mon directeur de recherche, monsieur François GAUTHIER, pour ses conseils, sa disponibilité et son encadrement. Merci également à mon codirecteur, monsieur Georges ABDUL-NOUR, pour ses conseils, sa disponibilité et son encadrement. Ce professeur aime motiver et pousser ses étudiants afin de les amener toujours plus loin dans leurs études. J'ai trouvé en eux deux, une très grande éthique et déontologie dans leur profession qui m'ont grandement marqué.

Un grand merci à mon codirecteur de projet chez Hydro-Québec, monsieur Raynald Vaillancourt, pour son soutien et ses propositions de pistes et d'études de cas où le cadre développé pouvait être appliqué, pour sa grande disponibilité, sa connaissance des enjeux et des contraintes de l'étude.

Remerciements à Hydro-Québec, au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) ainsi qu'à la Fondation UQTR pour le financement durant cette étude dans le cadre de la Chaire de recherche en gestion des actifs.

À toutes les personnes qui ont de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail, je vous remercie. Que tous trouvent dans ce document, l'expression de ma plus profonde gratitude. « Mi yetti jomira6o ».

## RESUMÉ

La gestion des actifs permet à une organisation d'atteindre ses objectifs par le biais d'actions coordonnées et intégrées à ses décisions stratégiques qui s'appuient sur une logique d'équilibre entre les coûts, risques et performances sur les actifs. Toutefois, dans le contexte des incertitudes qui entourent les changements climatiques et leurs impacts sur les systèmes de distribution de réseaux électriques, l'acceptabilité de la base de connaissances et des hypothèses, la caractérisation du comportement du système d'actifs, les besoins et attentes des parties prenantes ainsi que les types de perturbations à inclure dans les analyses, créent des défis dans sa prise de décision.

Ainsi, de nouveaux paradigmes s'imposent pour faire face à ces incertitudes et à leurs conséquences. Des modèles de prise décision en gestion des actifs qui utilisent la complémentarité entre la gestion du risque traditionnelle, la gestion du risque sous incertitudes et la gestion de la résilience qui corroborent tous ces facteurs susmentionnés, permettront donc de contribuer à relever ces défis. En ce sens, un modèle de prise de décision a été élaboré et mis en application à un cas d'espèce tiré d'Hydro-Québec distribution. Un cadre de gestion de la résilience a été également élaboré pour soutenir les actions sur les actifs visant son développement. Une modélisation permettant de pallier les lacunes de la quantification de la résilience a été appliquée à un cas particulier d'un évènement extrême chez Hydro-Québec. Enfin, une analyse coût-avantage entre la stratégie d'avoir des lignes aériennes ou souterraines a été effectué sur la base d'une estimation des coûts liés aux évènements extrêmes subis par le réseau de distribution d'Hydro-Québec et d'une analyse entre quelques caractéristiques pertinentes entre ces deux stratégies.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
RESUMÉ .....	v
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
AVERTISSEMENT .....	xii
<b>CHAPITRE 1 - DÉFINITION DU PROBLÈME DE RECHERCHE.....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Introduction</i> .....	1
1.2. <i>Problématique</i> .....	4
1.3. <i>Question de recherche et objectifs</i> .....	6
<b>CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE .....</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Introduction</i> .....	7
2.2 <i>Processus de la gestion des actifs (GDA) ou « asset management (AM) ».....</i>	7
2.2.1.    Notion d'un actif ou « asset ».....	7
2.2.2.    Historique et définition de la gestion des actifs ou « asset management » .....	8
2.2.3.    Modèles de gestion d'actifs .....	22
2.3. <i>Science de la complexité, système complexe et événements rares.....</i>	27
2.3.1.    Science de la complexité et système complexe .....	27
2.3.2.    Évènements rares.....	28
2.4. <i>Gestion du risque traditionnelle et ses lacunes au sein des systèmes .....</i>	31
2.5. <i>Passage de la gestion du risque traditionnelle à la gestion du risque sous incertitude.....</i>	36
2.6. <i>Passage de la gestion du risque sous incertitude à la gestion de la résilience</i> .....	41
2.7. <i>Gestion de la résilience en GDA.....</i>	43
2.7.1.    Analyse de la résilience .....	43
2.7.2.    Modèle et approches quantitatives de la gestion de la résilience .....	51

2.7.3.	Lien entre gestion du risque et gestion de la résilience .....	54
<b>2.8.</b>	<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b>55</b>
<b>CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE</b> .....		<b>56</b>
<i>3.1.</i>	<i>Introduction</i> .....	56
<i>3.2.</i>	<i>Rappel des objectifs</i> .....	56
<i>3.3.</i>	<i>Structure de la méthodologie</i> .....	56
<i>3.4.</i>	<i>Conclusion</i> .....	59
<b>CHAPITRE 4 - Conception du modèle de prise de décision et du cadre de gestion de la résilience .....</b>		<b>60</b>
<i>4.1.</i>	<i>Introduction</i> .....	60
<i>4.2.</i>	<i>Algorithme du modèle de prise de décision</i> .....	60
4.2.1.	<i>Construction de la base des évidences</i> .....	61
4.2.2.	<i>Base de connaissances</i> .....	62
4.2.3	<i>Analyse du système</i> .....	63
4.2.4.	<i>Évaluation de la base de connaissances</i> .....	66
4.2.5.	<i>Évaluation globale des risques</i> .....	69
4.2.6.	<i>Revue, jugement et prise de décision</i> .....	74
<i>4.3.</i>	<i>Approches génériques et spécifiques de la gestion de la résilience</i> .....	76
<b>CHAPITRE 5 - ÉTUDE DE CAS ET MISE EN APPLICATION DU CADRE DE PRISE DE DECISION.....</b>		<b>91</b>
<i>5.1.</i>	<i>Introduction</i> .....	91
<i>5.2.</i>	<i>Présentation de l'entreprise Hydro-Québec</i> .....	91
<i>5.3.</i>	<i>Description de l'évènement de la tempête automnale du 1<sup>er</sup> novembre 2019</i> 92	92
<i>5.4.</i>	<i>Données historiques d'interruptions de services d'Hydro-Québec lors de la tempête automnale du 1<sup>er</sup> novembre 2019</i> .....	93
<i>5.5.</i>	<i>Algorithme de programmation sur Matlab</i> .....	95
<i>5.6.</i>	<i>Modélisation du processus de récupération de la tempête</i> .....	96
<i>5.7.</i>	<i>Modélisation des coûts des évènements majeurs en contexte des lignes aériennes de distribution d'Hydro-Québec</i> .....	97

5.7.1.	<i>Données historiques des événements majeurs dans le service de distribution</i>	97
5.6.2.	Estimation de la fonction de répartition des coûts annuels des événements rares (pannes majeures) du service de distribution.....	98
5.7.3.	Test d'ajustement.....	101
5.6.4.	Calcul de la période de retour (périodicité) des pannes majeures .....	102
5.8.	<i>Coûts des pannes dans les lignes souterraines d'Hydro-Québec distribution</i> .....	103
5.9.	<i>Mise en application du cadre développé dans le contexte de l'étude de cas</i>	103
5.9.1	Base des évidences .....	103
5.9.2.	Base de connaissances.....	103
5.9.3.	Analyse du système.....	106
5.9.4.	Évaluation de la base de connaissances, analyse des hypothèses et de ses sensibilités	106
5.9.5.	Évaluation globale des risques .....	108
5.9.6.	<i>Revue, jugement et prise de décision</i> .....	111
5.10.	<i>Conclusion</i> .....	111
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>112</b>
	<b>Annexe A (confidentielle) - Coût des pannes majeures, leurs clients heures-interruptions (CHI) et leurs jours évènement extrême, Hydro Québec distribution.....</b>	<b>115</b>
	<b>Annexe B (confidentielle) - Données sur la détermination des paramètres Gumbel &amp; Graphique Gumbel pour les investissements annuels dans les pannes majeures en aérien .....</b>	<b>116</b>
	<b>Annexe D (confidentielle) - Période de retour des investissements dans les pannes majeures en aériens .....</b>	<b>118</b>
	<b>Annexe E (confidentielle) - Ratio des coûts, taux interruption, durée de vie et coût de remplacement des principaux éléments entre la structure aérienne et la structure souterraine ainsi que les coûts liés à la gestion de la végétation .....</b>	<b>119</b>
	<b>Annexe F - Impacts importants des changements climatiques et leurs conséquences pour Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2017, p. 64; 2018, p. 49).....</b>	<b>120</b>

Annexe H - Indice de durée d'interruption moyenne du client (Customer Average Interruption Duration Index « CAIDI ») .....	121
RÉFÉRENCES .....	122

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Cycle de vie d'un actif ou d'un système d'actifs adapté de Badurdeen et al. (2012); IAM (2015); Ouertani et al. (2008); PAS-55 (2008).....	21
Figure 2.2. Cadre de gestion d'actif selon la norme ISO 55 001 (2014).....	24
Figure 2.3. Système de gestion d'actif adapté de la norme PAS-55 (2008) .....	25
Figure 2.4. Cadre de conception de gestion d'actifs, adapté d'IAM (2015) .....	26
Figure 2.5. Courbe risque = f (coût de réduction), adapté de Bostick et al. (2018).....	42
Figure 2.6. Étape de la gestion de la résilience, source (Linkov et al., 2014).....	46
Figure 2.7. Triangle de la résilience adapté de Zobel (2011).....	52
Figure 3.1. Structure de la méthodologie.....	58
Figure 4.1. Base des évidences dans la prise de décision.....	61
Figure 4.2. Base des connaissances.....	62
Figure 4.3. Analyse du système.....	63
Figure 4.4. Évaluation de la base de connaissance.....	68
Figure 4.5. Évaluation globale des risques.....	70
Figure 4.6. Revue, jugement et prise de décision .....	75
Figure 4.7. Cadre générique de gestion de la résilience.....	85
Figure 5.1. Évaluation du service et des pannes lors de la tempête .....	93
Figure 5.2. Modélisation de la courbe de récupération de la tempête.....	96

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines .....	11
Tableau 2.2 - Définition d'un évènement rare .....	29
Tableau 2.3 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque traditionnelle .....	32
Tableau 2.4 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque sous incertitude.....	39
Tableau 2.5 - Outils/supports pertinents de la gestion de la résilience .....	48
Tableau 4.1 - Approches générées de la gestion de la résilience .....	77
Tableau 5.1 -Données historiques des interruptions de service et de leur pourcentage de récupération.....	94

## **AVERTISSEMENT**

Les opinions contenues dans ce document ne relèvent aucunement d'Hydro-Québec non plus du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et ni de la Fondation de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Elles n'émanent que de ses auteurs. Aucune de ces entités ou personnes physiques ou morales susmentionnées, ne peuvent être tenues responsables d'une quelconque utilisation des résultats obtenus dans ce document.

# CHAPITRE 1 - DÉFINITION DU PROBLÈME DE RECHERCHE

## 1.1. Introduction

Les actifs peuvent être définis par tous biens (matériels ou immatériels) qui participent à la création des opportunités dans le but d'atteindre un objectif (IAM, 2015). Dès lors, ils représentent une valeur énorme autant pour les organisations que pour la société (Ruitenburg et al., 2014). Leur gestion contribue à la fois, au bon fonctionnement de la société moderne (IAM, 2015) et à la performance des entreprises (El-Akruti et al., 2013).

Toutefois, plusieurs stratégies d'entreprises ont échoué à cause des lacunes dans la gestion des actifs causées par l'absence de connaissances sur les systèmes étudiés et la nature de leurs interconnectivités et leur auto-influences ainsi que la faible capacité humaine à appréhender tous les aspects de l'incertitude (Aven, 2015; Paté-Cornell, 2012; Taleb, 2007). Cet échec est dû au fait que les activités de cette gestion ainsi que **l'interdépendance** entre les actifs sont peu prises en compte au sein des organisations (El-Akruti et al., 2013). Cette interdépendance constitue l'interconnexion des facteurs technique, organisationnel, social et économique au sein des systèmes d'actifs ainsi que la dépendance d'autres structures critiques sur ces systèmes complexes. De ce fait, la gestion des actifs vise à assurer la pérennité des activités d'une organisation dans le long terme. Il devient donc nécessaire d'assurer la prévision de tous les facteurs pertinents qui influent sur ces décisions techniques et commerciales (Komljenovic et al., 2016).

De nos jours, **l'interdépendance** entre les actifs continue de s'accroître haussant ainsi le niveau d'instabilité qui constitue la source de situations incontrôlables (Helbing, 2013). Ainsi, la gestion des risques fait partie intégrante de la stratégie et du fonctionnement d'une organisation visant sa durabilité (Senthil et al., 2018). L'identification des événements et des facteurs qui peuvent avoir des effets néfastes sur les actifs s'avère donc nécessaire pour permettre de prendre des mesures appropriées afin de pouvoir saisir le plein potentiel de celles-ci.

En outre, les systèmes d'actifs sont des systèmes complexes indispensables au bon fonctionnement d'une société moderne (Bostick et al., 2018; Van Der Merwe et al., 2018). Ils incluent sans s'y limiter, les plateformes pétrolières, les réseaux de transports, les systèmes de distribution d'eau et de gaz, les centrales nucléaires, le système boursier, les réseaux de communication et les réseaux de distribution d'électricité (Bostick et al., 2018; Jain, Pasman, et al., 2018; Zio, 2016). Ils constituent des réseaux avec plusieurs composantes qui interagissent les unes avec les autres de manière non linéaire et peuvent évoluer de manière ni complètement régulière ni complètement aléatoire (Sayama, 2015). D'après Bohórquez Arévalo et Espinosa (2015), ce sont des systèmes qui d'une part, fonctionnent avec une dynamique non linéaire, caractérisée par l'émergence, l'auto-organisation et l'évolution et d'autre part, suivent un ordre qui est susceptible d'être brisé par des changements soudains (faible ou fort) conduisant à de nouvelles configurations (formes, moments et comportements).

La non-linéarité fait que les entrées ne sont pas nécessairement proportionnelles aux sorties et que le système est composé de boucles de rétroaction interconnectées (Reiman et al., 2015). L'émergence montre qu'il y a apparition de propriétés du système qui étaient absentes dans les conditions initiales ou prévisibles auparavant (Stace et Goldstein, 2006). L'auto-organisation implique qu'il y ait création de nouvelles interactions entre les composants qui sont causés par l'interaction et l'émergence au sein même du système (Bonabeau et al., 1999). L'évolution montre que le système s'adapte et change de configurations au cours du temps (Bohórquez Arévalo et Espinosa, 2015).

Dans ces systèmes complexes, le passé et les évènements qui les entourent, justifient leur configuration actuelle (Dekker et al., 2011; McMillan, 2008; Reiman et al., 2015). C'est ce qui fait que les conditions dans ces systèmes sont irréversibles (Dekker et al., 2011). Ils constituent des systèmes qui évoluent au bord du chaos, c'est-à-dire qui fonctionnent entre ordre et désordre, régularité et irrégularité, stabilité et instabilité, équilibre et déséquilibre (Reiman et al., 2015). Ce sont également des systèmes imbriqués, ce qui

signifie que les éléments du système peuvent être eux-mêmes des systèmes complexes (Byrne et Callaghan, 2013).

Selon Jain, Pasman, et al. (2018), les systèmes complexes constituent un mélange de plusieurs sous-systèmes techniques et sociaux, interagissant les uns avec les autres dans des configurations non linéaires. De plus, la forte interconnexion sociale, technique et économique, rend les systèmes complexes plus interdépendants et par conséquent, fait que les approches de la gestion de risques deviennent inefficaces face aux risques émergents (Aven, 2017; Bostick et al., 2018; Linkov et al., 2014; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017; Quigley et Revie, 2011; Straub et al., 2016; M. Yang et al., 2015). Les accidents surviennent dans les systèmes complexes à cause de l'incompréhension des interactions en leur sein (Jain, Pasman, et al., 2018). C'est ce qui conduit au fait que les investissements en gestion de risques continueront d'augmenter de plus en plus sans pour autant assurer leur efficacité face aux incertitudes et aux surprises.

En outre, les évènements qualifiés de rares ou extrêmes ont des effets désastreux tant sur la vie humaine, environnementale et économique que sur la pérennité des organisations (El-Gheriani et al., 2017; M. Yang et al., 2015). Ces phénomènes sont définis par « *highly improbable undesired events but with severe consequences* » (M. Yang et al., 2015, p. 102). Ils incluent les accidents nucléaires, les catastrophes naturelles, les changements politiques radicaux, les changements climatiques, les défaillances majeures d'actifs critiques, les pertes de clients importants, les pandémies, etc. Sans se limiter à ces exemples, les évènements rares ou extrêmes sont des évènements imprévisibles et catastrophiques que les méthodes statiques conventionnelles ne peuvent estimer (Quigley et Revie, 2011). Ils se produisent le plus souvent dans les systèmes complexes (Komljenovic et al., 2016; Mendonça et al., 2009; Taleb, 2007).

Ainsi, des causes et des conséquences imprévisibles défient de plus en plus la gestion de risques dont elle n'en a pas encore les remèdes. La possibilité de surprise y devient le dilemme central (Ben-Haim, 2012). Or, la vulnérabilité de ces systèmes complexes a un

impact néfaste majeur sur la vie humaine, économique et environnementale (Bostick et al., 2018). Par exemple, les évènements suivants mettent en relief les lacunes de la gestion du risque dans les systèmes complexes : l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima (Murakami et al., 2018; Yamaguchi et Kunugita, 2018), l'attentat du 11 septembre aux États-Unis (Gin et al., 2014; Jordan et al., 2018; Schweinberger et al., 2014), la marée noire de Deepwater Horizon de BP (Simon-Friedt et al., 2016; Skogdalen et Vinnem, 2012), l'ouragan Katrina (Kantha, 2013; Labib et Read, 2015) , etc.

Une façon théorique d'atténuer les risques qui deviennent indénombrables voire imprévisibles au vu de la complexité et des fortes interdépendances au sein des systèmes complexes, serait d'avoir un système capable de maintenir ou rétablir vite ses fonctionnalités à tout moment, malgré l'impact des perturbations, quelles qu'elles soient. C'est ce que la littérature définit par la résilience ou « *resilience* ». Elle est vue comme une approche qui intègre les incertitudes, atténue les conséquences des risques qu'importe leur prévisibilité voire imprévisibilité et améliore la capacité d'un système à se remettre d'une perturbation (Linkov et al., 2014; Sikula et al., 2015).

## 1.2. Problématique

Dans le cas du contexte mentionné précédemment, il y a lieu de développer des méthodes permettant de faire face à la complexité des systèmes ainsi que leurs incertitudes (Zio, 2016). À cela s'ajoute le fait que les interdépendances entre les actifs font qu'un dysfonctionnement au sein de ces systèmes puisse provoquer de graves conséquences (F. Khan et al., 2016). Cependant, malgré le développement de la gestion des risques, elle continue toujours de présenter des lacunes à savoir : l'incapacité d'imaginer tous les scénarios possibles, la concentration sur la prévention de la défaillance de composants individuels et l'acceptation des risques résiduels sans définir avec exactitude leurs conséquences (Bostick et al., 2018).

En dépit de ces lacunes de la gestion des risques, parmi les exigences de la norme internationale sur la gestion des actifs, il est stipulé que l'entreprise doit déterminer les

risques qui nécessitent des actions afin de prévenir ou limiter les effets indésirables sur les actifs (ISO-55001, 2014). De ce fait, les évènements improbables et catastrophiques constituent un défi majeur pour la gestion des risques en ingénierie et dans plusieurs autres disciplines (Paté-Cornell, 2012). Sur ce, Aven (2013b) souligne la nécessité d'élargir la gestion des risques pour qu'elle puisse aider à se prémunir contre ces évènements.

Cependant, il s'est avéré que les méthodes classiques de la gestion de risques en gestion des actifs, en contexte de ces systèmes complexes, sont de plus en plus inefficace (Komljenovic et al., 2016; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017). Pour y remédier, il y a plusieurs appels soutenant l'adoption de la gestion de la résilience qui est un complément par rapport aux insuffisances de la gestion du risque (Aldunce et al., 2015; Bostick et al., 2018; Mentes et Turan, 2018; Ongkowijoyo et Doloi, 2018; Parker et Ameen, 2018).

Ainsi, un système résilient peut mieux survivre lorsqu'il subit des perturbations ou des menaces surprises (Jain, Pasman, et al., 2018). Aven (2017, p. 536) soutient que « *resilience analysis and management are especially suited for confronting unknown and uncertain categories of events* ». C'est ce qui a suscité la nécessité du changement de paradigme menant de la gestion de risques à la gestion de la résilience au sein des systèmes complexes (Aven, 2018; Etinay et al., 2018; Jain, Pasman, et al., 2018; Linkov et al., 2014; Linkov et al., 2013; Sikula et al., 2015).

Toutefois, il y a une absence de métriques et de méthodologies applicables dans le cadre de la résilience (Bostick et al., 2018; Patriarca, Bergström, et al., 2018). Or, il y a une urgence pour le développement de cadres et de modèles d'analyse et de gestion de la résilience (Linkov et al., 2014). En ce sens, Aven (2018) souligne qu'il y a la nécessité de donner désormais plus d'importance à l'amélioration de la résilience. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui cherche à contribuer à l'avancement des connaissances dans ce domaine.

### 1.3. Question de recherche et objectifs

#### *Question de recherche*

Comment faire face aux incertitudes qui entourent les perturbations au sein des systèmes complexes ?

#### *Objectif général*

Développement d'un modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience intégré à la gestion des actifs et adapté aux systèmes complexes.

#### *Objectifs spécifiques*

- Mettre au point un algorithme pour l'adoption du modèle de prise de décision.
- Développer un ensemble de principes et d'approches de gestion de la résilience qui complète la gestion risque dans le contexte des systèmes complexes.
- Mise en application du modèle de prise de décision élaboré en contexte du réseau de distribution électrique d'Hydro-Québec.

Mots clefs : risque, résilience, prise de décision, incertitude, système complexe, gestion actifs, système électrique, évènement rare.

## CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents concepts qui sont impliqués dans l'étude. Ceux-ci incluent les notions suivantes : actifs, gestion d'actifs, modèles de gestion d'actifs, science de la complexité, système complexe, événements rares, gestion du risque traditionnelle, gestion du risque sous incertitude et gestion de la résilience. Il a pour but de dresser le portrait l'état des connaissances de ces concepts dans la littérature scientifique.

### 2.2 Processus de la gestion des actifs (GDA) ou « *asset management (AM)* »

#### 2.2.1. Notion d'un actif ou « *asset* »

La notion d'actif ou « *asset* » d'une organisation peut être définie de différentes manières. Selon l'Institute of Asset Management, les actifs constituent tous biens qui participent à la création de valeurs dans une organisation (IAM, 2015). Dans leurs travaux, Baskarada et al. (2005) le définissent comme quelque chose qui a une valeur économique et qui appartient aux biens d'une organisation.

Dans le domaine des infrastructures, selon l'International Infrastructure Management Manual, un actif est défini comme « *a physical component of a manufacturing, product or service facility which has value, enables services to be provided, and has an economic life of more than twelve months* » (IIMM, 2006).

La norme britannique sur la gestion des actifs physiques, PAS-55 (2008) définit un actif ou « *asset* » comme « *plant, machinery, property, buildings, vehicles and other items that have a distinct value to the organization* ». Elle classe les actifs selon cinq catégories à savoir : physiques, humains, informationnels, financiers et intangibles (réputation, moral, propriété intellectuelle, bonne volonté, etc.).

D'après la norme internationale qui couvre la gestion des actifs ISO-55000 (2014), un actif ou « *asset* » est vu comme « *item, chose ou entité qui a une valeur potentielle ou réelle pour un organisme* ». Dans cette norme, la notion de valeur est définie comme toute ressource matérielle ou immatérielle qui revêt des risques et des responsabilités pour une entreprise. Les actifs non physiques y sont définis par les biens immatériels et ceux qui sont physiques par les biens matériels.

En somme, toute ressource, qu'elle soit tangible ou intangible appartenant à une organisation ou sous sa responsabilité et qui participe à sa création de valeur, est considérée comme un actif. Eu égard aux définitions précédemment et des objectifs visés par cette étude, un actif sera défini comme suit :

« *Un bien matériel/immatériel appartenant aux ressources techniques et/ou économiques qui participe à la création de valeur à une organisation* ».

L'actif permet à une organisation d'atteindre ses objectifs stratégiques qui concordent avec les besoins de ses parties prenantes. Pour y parvenir, une gestion de ces actifs est nécessaire afin d'optimiser leurs utilisations, bénéficier de leurs pleins potentiels et assurer leurs pérennités.

### 2.2.2. Historique et définition de la gestion des actifs ou « *asset management* »

La gestion des actifs (GDA) ou « *Asset Management (AM)* » a été utilisée la première fois dans les années 1980 au Royaume-Uni, en Australie et en Nouvelle-Zélande dans le but d'assurer la performance des actifs, la sécurité, la production de biens ou de services, la réduction des coûts, le support de la planification stratégique et la priorisation des activités sur les actifs et ce, par le biais d'actions proactives (Heck, 2008; IAM, 2015). Selon IAM (2015), ces premières applications furent dans le domaine du pétrole, du gaz et du secteur public. Dès 1988, elle a permis pendant des décennies à la « *US national Council on Public Works* » de définir des politiques dans le domaine des infrastructures

et de l'eau pour assurer le niveau de service souhaité pour un coût de cycle de vie minimal (IAM, 2015).

En 1994, l'Institue of Asset Management (IAM) fut créée et commença à travailler avec différentes organisations qui aboutirent à l'établissement de la norme britannique sur les actifs physiques PAS 55 en 2004 qui fut renouvelée en 2008 (IAM, 2015). Finalement, ce n'est qu'en 2014 qu'une norme internationale qui la concerne, ISO 55000, fut publiée. C'est ce qui fait d'elle une jeune discipline en cours de maturation et d'expansion compte tenu de son rôle dans la création de valeurs ajoutées durables à une organisation par l'entremise des actifs (Komljenovic et al., 2016). En ce sens, au vu des vertus de la gestion des actifs (GDA), plusieurs secteurs d'activités ont commencé à créer une GDA spécifique aux leurs. Par exemple, les industries d'infrastructures en génie civil notamment celles de l'Australie, de l'Angleterre et des États-Unis ont adopté une GDA qui se définit comme un processus décisionnel rationnel qui a pour but de satisfaire le niveau de service exigé sur leurs actifs et qui optimise les coûts et les opportunités (S. Park et al., 2016). L'industrie nucléaire a développé une approche de la GDA basée sur la gestion des actifs à risques ou « *Risk Informed Asset Management (RIAM)* » qui est une approche de la gestion des risques qui soutient la planification à long terme des actifs et les décisions d'investissement pour améliorer la sécurité et l'économie (Vaurio, 2011). Les industries d'énergie électrique cherchent à développer une gestion des actifs appropriée pour mesurer, prédire et optimiser les coûts sur leurs systèmes de transmission d'énergie tout en optimisant les coûts d'investissement et de maintenance (Lacroix et Stevenin, 2016).

Plusieurs progrès ont été accomplis dans cette discipline à travers le monde (IAM, 2015). Sa nécessité est née de la nature complexe des systèmes modernes (Hastings, 2015). Ceci est dû à la mondialisation du marché, l'évolution rapide de la technologie, la concurrence ardue entre les entreprises qui font face à des clients exigeants, l'apparition d'évènements perturbateurs, etc.

Pour définir la gestion des actifs, plusieurs paramètres intrinsèquement liés à l'organisation, s'imposent. Ces paramètres dépendent des valeurs, du besoin/attente/implication des parties prenantes, du contexte commercial et opérationnel, de la législation, des ressources et des plans et objectifs de l'organisme (IAM, 2015; ISO-55001, 2014; PAS-55, 2008).

Hastings (2015, p. 11) soutient que « *asset management supports the realization of value while balancing financial, environmental and social costs, risk, level and quality of service, and asset performance* ».

La norme britannique sur la gestion des actifs, PAS-55 (2008), la définit comme :

« *Systematic and coordinated activities and practices through which an organization optimally and sustainably manages its assets and asset systems, their associated performance, risks and expenditures over their life cycles for the purpose of achieving its organizational strategic plan* ».

La norme internationale sur la gestion des actifs ISO 55 000 définit la gestion des actifs comme « *activités coordonnées d'un organisme dans le but de réaliser de la valeur à partir d'actifs* ». Elle y spécifie que l'ajout de la valeur est réalisé lorsqu'il y a un équilibre entre les coûts, les risques, les opportunités et les performances. Selon Khuntia et al. (2016), la gestion des actifs est vue comme le processus de maximisation du retour sur investissement des actifs durant leur cycle de vie par le biais de la maximisation des performances et de minimisation des dépenses. Pour mieux cerner sa définition et les concepts sur lesquels elle mise, des études de l'amélioration de la gestion des actifs dans différents domaines sont illustrées dans le tableau 2.1 suivant.

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(S. Park et al., 2016)	Centralisation de la gestion des actifs, des infrastructures sur l'inspection de la sécurité	Élaboration d'une approche managériale et économique optimale pour minimiser le coût total du cycle de vie des actifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau de service souhaité</li> <li>• Niveau d'efficacité du système de gestion des actifs adapté</li> <li>• Coûts du cycle de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vieillissement des actifs</li> <li>• Budget</li> </ul>	<p>Revue des systèmes de gestion des actifs dans les pays développés et des normes internationales.</p> <p>Revue de l'état actuel de la gestion des actifs du système étudié (infrastructures en Corée).</p> <p>Comparaison entre cet état actuel de la gestion des actifs, ces systèmes de gestion d'actifs et les normes internationales.</p> <p>Définition des étapes d'élaboration d'un manuel général de la gestion d'actifs. Il comprend les dispositions relatives à la gestion des actifs, le manuel, les conseils et le processus de contrôle. Élaboration d'un exemple brouillon du contenu du manuel qui comprend les éléments suivants : établissement de politiques et d'objectifs, liste des actifs et historique, évaluation de la performance, configuration des alternatives et optimisation, surveillance et retour d'information.</p>	<p>L'élaboration d'un manuel général pour la gestion des actifs des infrastructures constitue une directivité politique durable pour épauler les lacunes dans cette discipline</p>

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(El-Akruti et al., 2013)	Manque d'intégration de la gestion des actifs dans les décisions stratégiques des organisations	Mise au point d'une approche holistique explorant le rôle de la gestion des actifs dans le développement et la mise en œuvre de stratégies d'une organisation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance des actifs</li> <li>• Coût du cycle de vie des actifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau de coordination entre les activités des actifs</li> <li>• Niveau d'expérience et de responsabilité du gestionnaire des actifs</li> </ul>	<p>Revue des approches de la gestion d'actifs. Étude de cas dans deux entreprises où ces approches de gestion d'actifs ont été alignées avec des éléments stratégiques déclenchés par des événements spécifiques.</p> <p>L'étude des deux cas s'est déroulée comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- identification de la solution de la gestion d'actifs mis en œuvre face à l'évènement stratégique;</li> <li>- analyse de la mise en œuvre de la solution d'actifs;</li> <li>- établissement des indicateurs sur la performance des solutions et analyse de leurs résultats opérationnels et contributions à la stratégie adaptée;</li> <li>- apprentissage sur le processus adapté (cartographie et interprétation du statut des activités et de ses relations avec la stratégie).</li> </ul>	<p>Il a été montré qu'il existe un lien étroit entre la stratégie de l'entreprise et les activités de la gestion des actifs. Un cadre de la gestion a été proposé. Il constitue une approche systématique et holistique liant la gestion des actifs à la stratégie de l'entreprise.</p>

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Komonen et al., 2006)	Faible retour sur investissement des capitaux physiques dans les entreprises à forte intensité	Développement d'un cadre pour la gestion d'actifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût du cycle de vie</li> <li>• Profits</li> <li>• Performance des actifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau d'identification de la demande du marché</li> <li>• Niveau de la concurrence</li> <li>• Niveau de performance technologique</li> <li>• Niveau de profondeur des analyses (techniques, économiques et des risques)</li> </ul>	<p>Synthèse de la littérature basée sur les méthodes d'analyse et de prise de décision sur les actifs pour permettre de mettre en place un cadre de gestion des actifs sur la maintenance des équipements qui intègre tous les niveaux de l'entreprise.</p> <p>Ce cadre utilise les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- détermination de la stratégie de gestion à adopter sur les différents actifs et à chacun de niveau de l'organisation;</li> <li>- détermination des approches de gestion des actifs que doit adopter l'organisation pour aligner les objectifs stratégiques avec les stratégies organisationnelles pour les moyen et long termes.</li> <li>- détermination de la gestion des actifs au niveau des équipements. Elle se concentre sur la maintenance des équipements et de leurs composants et se base sur les exigences commerciales de l'entreprise.</li> </ul>	<p>Le cadre de la gestion des actifs développé dans cette étude s'effectue sous trois niveaux : entreprise, installation et équipement.</p> <p>D'autres développements sont nécessaires pour renforcer des modèles économiques et techniques afin de soutenir cette étude.</p>

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Shah et al., 2017)	Manque d'harmonisation de la gestion des actifs des autoroutes avec le processus de prises de décision	Définition des défis et des perspectives dans l'application des principes de la gestion des actifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance des actifs</li> <li>• Opportunités sur les actifs</li> <li>• Risques sur les actifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande des parties prenantes</li> <li>• Budget</li> <li>• Niveau d'information (aspect humain et intangible)</li> <li>• Niveau d'implication de la direction</li> <li>• Niveau d'inventaire de données sur les actifs</li> <li>• Niveau de connaissances sur les actifs et leurs interactions</li> </ul>	<p>Développement d'un questionnaire pour évaluer la manière dont les principes de la GDA sont adoptés dans les entreprises (78 réponses sur 470 questionnaires envoyés).</p> <p>Les répondants aux questionnaires (membres du personnel de toutes les divisions et équipes travaillant dans l'entretien des routes au Royaume-Uni) ont été sélectionnés de façon aléatoire.</p>	<p>La réduction du budget a réduit le niveau d'entretien des infrastructures routières. La prise de conscience de l'importance constitue la rencontre des lacunes dans les organisations. Les politiques stratégiques de la GDA ne sont pas définies.</p> <p>Il est nécessaire de mettre davantage de ressources pour développer la GDA. Une certification ISO55000 permettrait d'agrandir la capacité de la GDA.</p>

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Kortelainen et al., 2015)	Manque d'outils de développement durable basés sur la gestion des actifs	Amélioration de la gestion des actifs grâce aux outils de la durabilité.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gain économique</li> <li>• Niveau du respect de l'environnement</li> <li>• Niveau du respect social</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau du changement de marché</li> <li>• Niveau du changement de la concurrence</li> <li>• Niveau d'obsolescence</li> <li>• Niveau de modification de changement dans la création de valeur</li> <li>• Niveau de changement dans les opérations</li> <li>• Niveau d'usure et de vieillissement des actifs</li> </ul>	<p>Revue de la littérature sur les forces motrices de la gestion des actifs.</p> <p>Utilisation de la feuille de route visionnaire (<i>road map process</i>) sur les court, moyen (5 ans) et long (10 ans) termes.</p> <p>Les perspectives futures visées sont les cinq éléments suivants à savoir : parties prenantes, écosystème commercial, critères de succès, bénéfices/valeurs, catalyseurs/obstacles.</p> <p>Les critères de durabilité sont les valeurs suivantes : économique, environnementale et sociale.</p> <p>Organisation d'un atelier pour évaluer la feuille de route.</p>	<p>Une création de valeur durable semble avoir des effets importants sur la gestion des actifs. Ceci crée des besoins en nouvelle gouvernance, méthodologie et outils de gestion pour la prise de décision liée aux actifs. Toutefois, du fait que le nombre d'experts participant à cet atelier soit réduit, les résultats peuvent être considérés comme préliminaires.</p>

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Ouertani et al., 2008)	Lacune dans l'optimisation de l'utilisation des actifs	Développer une stratégie efficace de gestion des informations sur les actifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance sur les actifs</li> <li>• Coûts du cycle de vie</li> <li>• Risques sur les actifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité des données sur les actifs</li> <li>• Identification des informations</li> <li>• Technologies et systèmes de contrôle des informations</li> </ul>	Revue de la littérature sur la gestion des actifs, les méthodes d'acquisition et de gestion des données relatives aux actifs. Il y est déduit que les perspectives de la gestion des actifs puissent être restreintes sur deux aspects : financiers et techniques. L'aspect financier est axé sur la réduction des coûts, l'augmentation de la fiabilité, les performances et le retour sur investissement. L'aspect technique lui, se concentre sur l'information et la prise de décision. L'information fait référence à la gestion des données et la surveillance des actifs tout au long de leur cycle de vie. La prise de décision concerne la réalisation de diagnostics et les analyses nécessaires pour le support des parties prenantes des décisions sur le cycle de vie des actifs.	Une approche qui supporte la stratégie de la gestion des informations des actifs a été développée. Toutefois, elle a besoin d'être testée au sein d'une organisation.

Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Minnaar et al., 2013)	Manque de méthodes quantitatives pour aider l'implantation de la gestion des actifs	Mettre un cadre d'outils généraux numériques qui permette l'implantation de la norme PAS 55 ou l'ISO 55000 pour la gestion des actifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risques sur les actifs</li> <li>Performances des actifs</li> <li>Coûts du cycle de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le niveau d'analyse des données</li> <li>Le niveau de gestion du cycle de vie des actifs et leurs criticités</li> <li>Le niveau de la gestion des risques</li> <li>Les données statistiques de défaillances</li> </ul>	Analyse de la Norme BSI PAS 55 et de l'ISO 55000. Sélection dans ces deux normes des points en commun qui peuvent être faits de façon numérique. Analyse des méthodes numériques/quantitatives qui sont applicables à la gestion des actifs. Il y a six domaines qui sont présents dans ces deux normes où des méthodes quantitatives y sont applicables. Ces domaines sont : l'analyse de données, la gestion du cycle de vie, la criticité des actifs, l'analyse statistique des défaillances et le développement durable.	Les normes nous disent QUOI faire mais pas COMMENT le faire. Ainsi, un ensemble d'outils numériques applicables à la gestion des actifs ont été recensés. Ceux-ci pourront compléter ces normes.
(Ruitenberg et al., 2014)	Lacune dans les méthodes disponibles pour la gestion du cycle de vie des actifs causée par la collecte et la qualité des données	Identification des facteurs ayant des impacts sur la durée de vie des actifs.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coûts des objectifs</li> <li>Niveau de performance des objectifs</li> <li>Niveau de risques</li> <li>Niveau estimation de la durée de vie des actifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niveau d'identification de l'actif</li> <li>Niveau de collection générale des informations</li> <li>Niveau d'analyse critique sur l'actif</li> </ul>	Sur la base de la revue de la littérature, les approches basées sur les opinions d'experts et d'une étude de cas, une identification des facteurs qui ont un impact sur la durée de vie des actifs, a été réalisée. Développement d'un outil permettant de les identifier et application dudit outil dans une entreprise.	Développement d'un outil « <i>Lifetime Impact Identification Analysis (LIIA)</i> ». La première application de cette méthode dans une organisation, a donné des résultats positifs. Toutefois, son applicabilité devrait être élargie

						afin d'être généralisée.
--	--	--	--	--	--	--------------------------

Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Yazdandoost et Izadi, 2018)	Manque de l'analyse de l'impact du risque de défaillance des compteurs d'eau sur les revenus des services publics ainsi que le moment opportun pour leur remplacement	Utilisation de la gestion des actifs comme cadre holistique pour optimiser le coût du cycle de vie des compteurs d'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niveau de condition physique et opérationnelle des actifs</li> <li>Performance des actifs (acquittement des tâches)</li> <li>Niveau de service des actifs (appropriation des services délivrés)</li> <li>Niveau de risque des actifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taux de dégradation de la précision</li> <li>Prix de l'eau</li> <li>Indice HCI (<i>Hydraulic criticality index</i>)</li> <li>Taux d'actualisation réel</li> <li>Investissement initial</li> <li>Niveau du développement durable des actifs</li> </ul>	<p>Revue de littérature puis détermination d'un cadre de la gestion des actifs qui est un processus à quatre étapes : identification de l'état actuel des actifs, identification des actifs critiques et de leurs risques d'échec, minimisation des coûts du cycle de vie des actifs et planification financière à long terme.</p> <p>Application du cadre proposé dans un cas réel.</p>	<p>Un cadre de gestion des actifs qui réduit le risque maximal de défaillance des compteurs d'eau, a été élaboré. Ce cadre a été appliqué à un cas réel. Les résultats ont montré l'importance de tenir compte des risques de défaillance sur le remplacement optimal de ces compteurs.</p>

**Tableau 2.1 - Études d'amélioration de la gestion d'actifs dans différents domaines (suite)**

Auteurs	Problématiques	Objectifs	VD (variables dépendantes)	VI (variables indépendantes)	Méthodologies	Conclusions
(Petchrompo et Parlakad, 2019)	Lacune dans la gestion des actifs des systèmes multi-actifs.	Élaboration des tendances en matière de maintenance des systèmes multi-actifs.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance du système</li> <li>• Fiabilité du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau de dépendance des performances</li> <li>• Niveau de dépendance stochastique (défaillance)</li> <li>• Niveau de dépendance ressources</li> </ul>	Analyse des avantages et inconvénients de diverses méthodes d'optimisation et d'analyse multicritères en fonction de la catégorie d'actifs, de l'objectif visé et des méthodes utilisées par la littérature.	Les modèles considérés comme efficaces dans un système à plusieurs composants peuvent ne pas être applicables à un système à plusieurs actifs. Ceux-ci impliquent plus de parties prenantes et de critères. Leurs systèmes sont complexes et intègrent plusieurs critères de dimensions différentes.

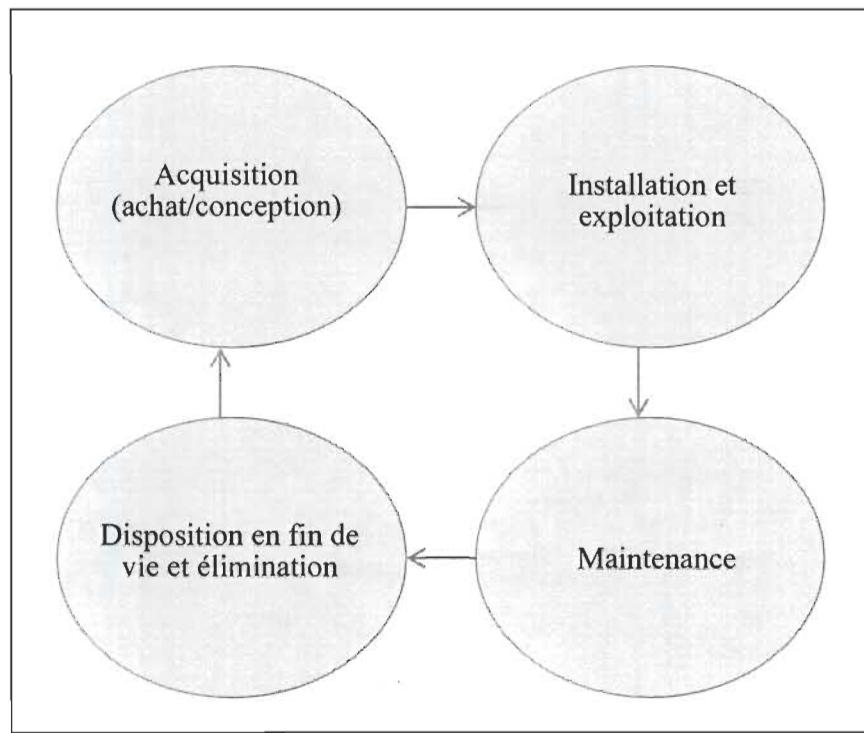
La synthèse du tableau 2.1 et les définitions de la GDA mentionnées précédemment, permettent de conclure que la gestion des actifs (GDA) repose sur les bases suivantes :

- une prise de décision multidisciplinaire, incorporée aux objectifs stratégiques de l'organisation, qui tienne compte des considérations techniques et commerciales;
- la création de valeurs ajoutées par le biais de la coordination systématique des actions sur les actifs et ce, sur la base d'informations fiables sur ceux-ci afin d'atteindre les objectifs d'une organisation;
- la recherche de l'équilibre entre les coûts, les risques et les performances sur le cycle de vie des actifs.

La prise en compte des décisions commerciales et techniques fait de la GDA, un processus complexe où un consensus des parties prenantes sur les valeurs, politiques, stratégies et tactiques de l'entreprise, est nécessaire (Spatari et Aktan, 2013). La GDA a pour avantage en termes d'optimisation des ressources, l'augmentation des gains et l'amélioration de la productivité (Shah et al., 2017). C'est ce qui fait d'elle un système qui intègre toutes les ressources (techniques, humaines et financières) d'une organisation ainsi que leurs activités dans le but de trouver un équilibre optimal adapté de celles-ci. La gestion des actifs nécessite une prise de décision systématique à tous les niveaux de l'organisation (Komonen et al., 2006).

La GDA incarne toutes les activités du cycle de vie d'un actif (El-Akruti et al., 2013). C'est un cycle qui doit intégrer les risques associés aux actifs et les conséquences qu'ils engendrent (Minnaar et al., 2013). Ce cycle de vie est composé par les étapes d'acquisition (conception/achat), d'installation, d'exploitation et d'entretien, de déclassement et d'élimination (Badurdeen et al., 2012; IAM, 2015; Ouertani et al., 2008; PAS-55, 2008). Il débute dès la phase d'acquisition et se termine à la fin de la phase du traitement en fin de vie. Le concept commun dans la gestion des actifs est d'arriver à maintenir le coût du cycle de vie des actifs au plus bas tout en assurant le niveau de service souhaité (Yazdandoost et Izadi, 2018). La figure 2.1 illustre ce cycle en le décomposant en quatre

phases à savoir : acquisition, installation et exploitation, maintenance et disposition en fin de vie et élimination.



**Figure 2.1.** *Cycle de vie d'un actif ou d'un système d'actifs adapté de Badurdeen et al. (2012); IAM (2015); Ouertani et al. (2008); PAS-55 (2008)*

En outre, la GDA intègre toutes les activités d'une entreprise du cycle de vie d'un actif jusqu'aux décisions stratégiques (IAM, 2015; PAS-55, 2008). La GDA est un ensemble d'activités coordonnées qui d'une part, se recentrent sur le cycle de vie des actifs pour y équilibrer les coûts, les opportunités et les risques et d'autre part, permettent de réaliser les objectifs de l'organisation. Toutefois, selon Edwards (2016), la GDA ne s'accentue pas seulement sur les actifs ou sur leur cycle de vie, mais aussi sur tout ce qui peut apporter de la valeur ajoutée durable à une organisation, à ses parties prenantes et à la société.

Ainsi, la gestion des actifs (GDA) ou « *asset management (AM)* » sera définie comme suit :

« *La GDA est un processus d'amélioration continue qui a pour but d'aider une organisation à atteindre ses objectifs et est soutenue par ses décisions stratégiques et ses ressources. Elle se concrétise d'une part, par l'entremise d'une gestion coordonnée et*

*intégrée des activités sur les actifs afin de bénéficier de leur plein potentiel tout au long de leurs cycles de vie et d'autre part, par le biais de tout ce qui est susceptible d'apporter à l'organisation une valeur ajoutée pérenne et ce, par la minimisation des coûts et des risques ».*

La GDA mise sur tout ce qui peut apporter de la valeur ajoutée à l'organisation, à ses parties prenantes et à la société. Ses activités s'alignent avec les objectifs de l'organisation qui tiennent compte de son contexte opérationnel/commercial, de ses ressources, des attentes et des exigences de ses parties prenantes, de ses valeurs, des lois et des règlements. Elle cherche à trouver un équilibre entre les coûts raisonnables, les risques et les opportunités sur les actifs afin de valoriser davantage leurs créations de valeurs ajoutées rentables et durables à l'organisation.

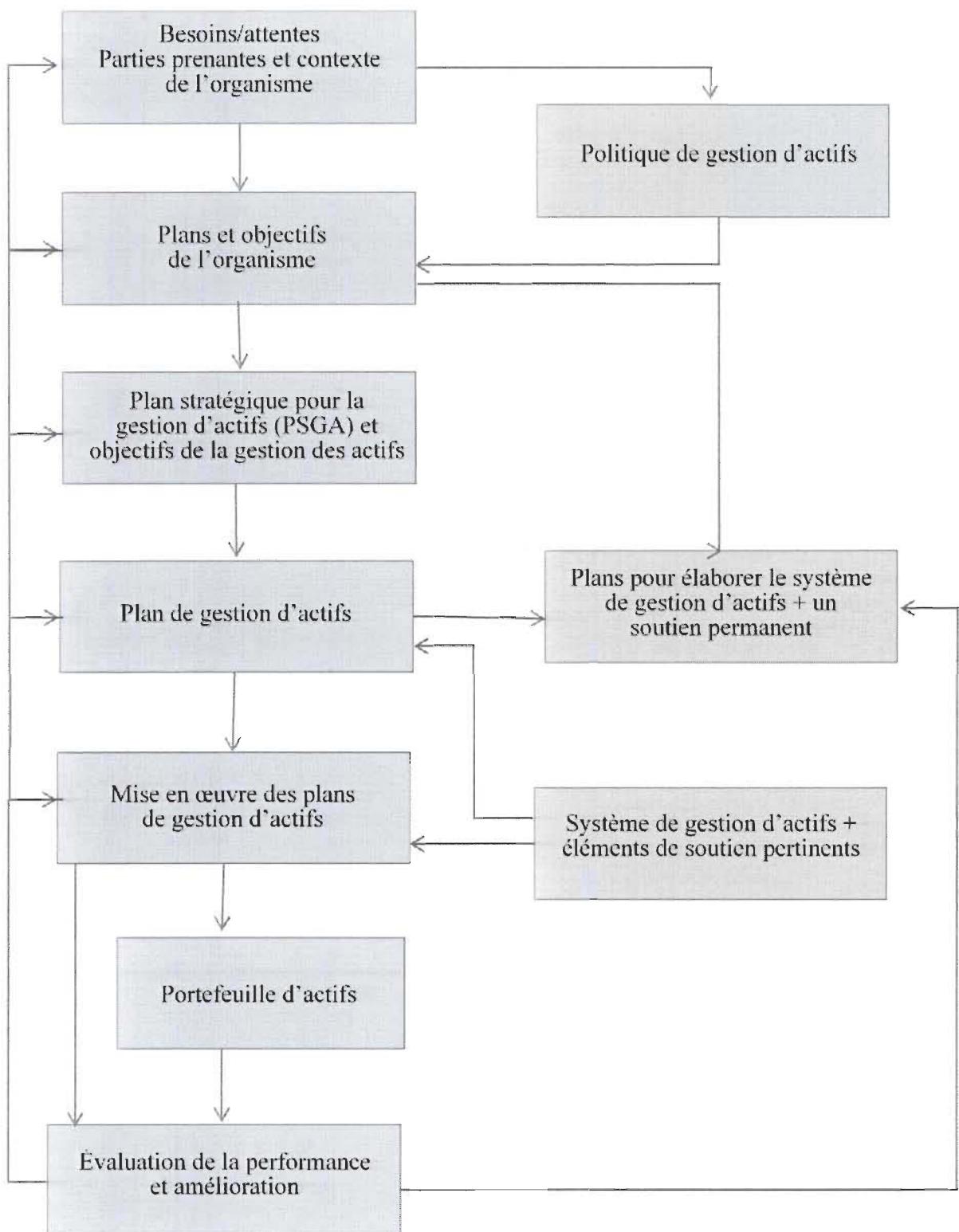
Cet équilibre recherché ne doit pas se porter uniquement sur chaque actif pris de manière indépendante, mais sur l'effet global de l'ensemble des actifs en tenant compte de leurs interdépendances dans la chaîne de production de valeurs ajoutées au sein du système étudié. Elle doit intégrer et faciliter la prise de décision. Elle s'élabore d'une part, par la mise en place d'une gestion intégrée de ses activités à tous les niveaux d'une organisation et d'autre part, par le biais de l'optimisation des aspects financiers et techniques. Elle devrait également œuvrer en permanence afin de prévenir une organisation contre les scénarios de risques qui peuvent avoir des effets désastreux sur sa création de valeur. Cette nécessité a été discutée dans la problématique de cette étude.

#### **2.2.3. Modèles de gestion d'actifs**

Plusieurs cadres de gestion des actifs sont illustrés dans la littérature. Ils se définissent comme des modèles conceptuels ou de guides expliquant comment devrait se faire la prise de décision en gestion des actifs de manière efficace par le biais d'une intégration appropriée de divers modèles, de méthodologies et de ressources en contexte de la gestion des actifs (Sun et al., 2008).

La norme internationale sur la gestion des actifs, ISO-55001 (2014), a élaboré un cadre pour la gestion d'actifs qui est représenté par la figure 2. Sur celle-ci, ses éléments principaux sont décrits comme suit :

- les plans et objectifs se basent sur la connaissance au sens large du contexte de l'organisme, de l'orientation de ses activités et des besoins/exigences de ses parties prenantes;
- le plan stratégique pour la gestion d'actifs (PSGA) clarifie les directives et le rôle du système de gestion d'actifs (système de management des actifs dont la fonction est de définir la politique et les objectifs de gestion d'actifs) pour atteindre les objectifs de l'organisme par le biais de la gestion d'actifs. Il définit l'objectif de cette dernière et détermine le périmètre du système de gestion des actifs, sa limite et son applicabilité;
- la politique de gestion d'actifs doit s'aligner avec les plans et objectifs de l'organisme et aider à fournir un cadre de gestion des activités et les conditions nécessaires pour la réalisation des objectifs de la gestion des actifs;
- le plan de gestion des actifs définit les ressources (matérielles ou immatérielles) et les contraintes (délais) pour que les objectifs de la gestion d'actifs soient atteints;
- le portefeuille d'actifs fait référence à l'ensemble des actifs couvert par le périmètre de la gestion des actifs;
- les éléments de soutien pertinents constituent l'ensemble des ressources nécessaires pour atteindre les objectifs de la gestion des actifs.



**Figure 2.2. Cadre de gestion d'actif selon la norme ISO 55 001 (2014)**

D'après la norme britannique (BSI) sur la gestion des actifs, PAS-55 (2008), les principes clés d'une gestion d'actifs sont les suivants : systématique, systémique, basé sur le risque, optimal, durable, holistique et intégré. Cette norme fournit un modèle de gestion des actifs qui est représenté par la figure 2.3.

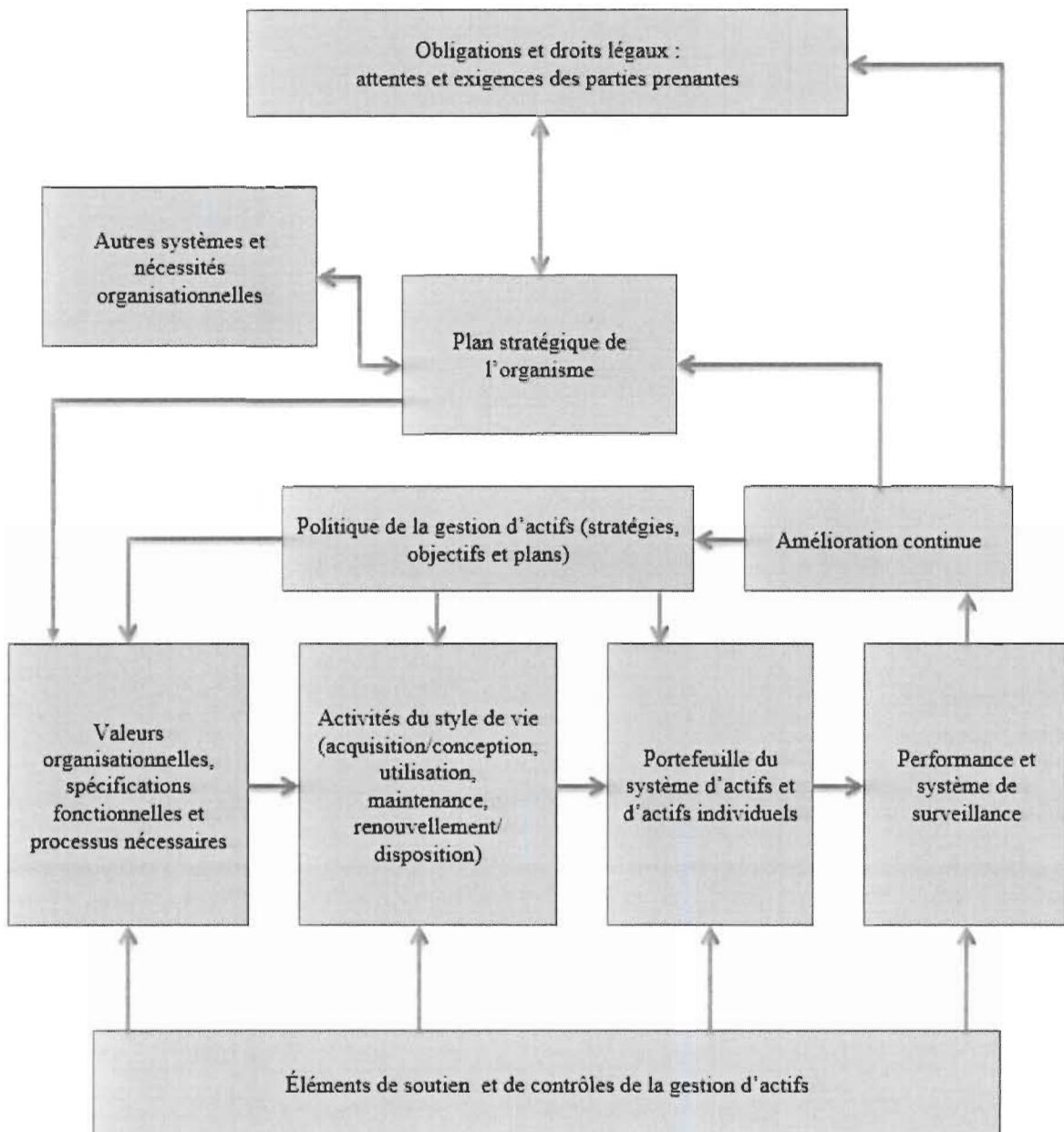
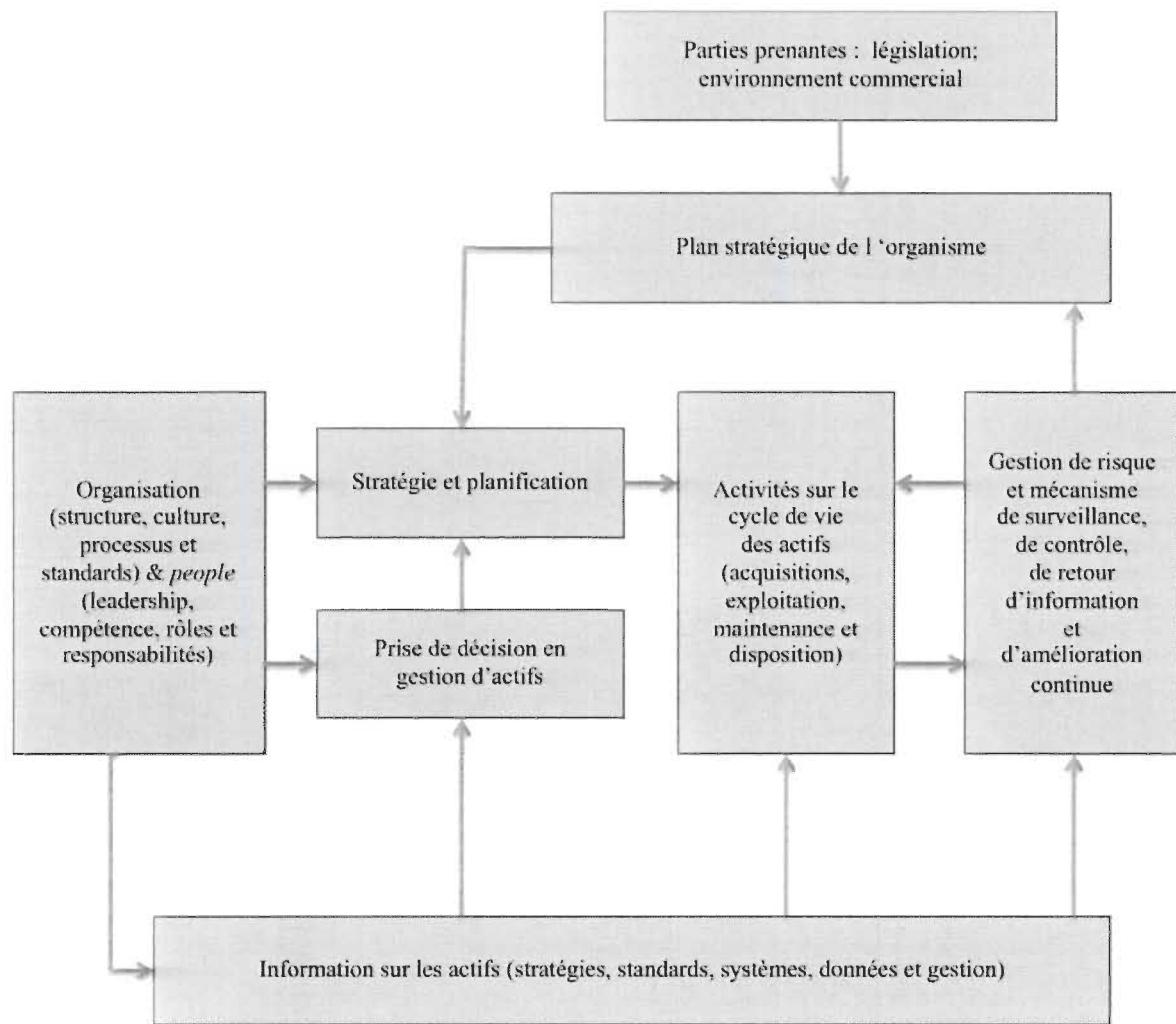


Figure 2.3. Système de gestion d'actif adapté de la norme PAS-55 (2008)

L’Institute of Asset Management (IAM) a défini un modèle conceptuel pour la gestion d’actifs. Celui-ci est présenté à la figure 2.4.



**Figure 2.4. Cadre de conception de gestion d'actifs, adapté d'IAM (2015)**

Ces cadres et modèles de gestion d’actifs, ci-haut cités, ont en commun les éléments suivants :

- se basent sur la législation et les règlements qui régissent l’organisme, son contexte commercial/opérationnel et des attentes/exigences de ses parties prenantes;
- ont comme assise les objectifs et plans stratégiques de l’organisme;

- prennent en compte la spécification technique, organisationnelle et sociale de l'organisme;
- déterminent les limites et l'applicabilité du portefeuille couvert par les actifs;
- font appel aux soutiens (ressources, politique, systèmes de gestion, implication de la direction et des parties prenantes, stratégies et planification, information, etc.) nécessaires pour la création de valeurs ajoutées durables *via* les actifs tout au long de leur cycle de vie;
- s'impliquent dans la coordination et l'intégration des activités de la gestion d'actifs au sein de l'organisme ainsi que leurs surveillances, leurs contrôles et leurs améliorations continues.

### **2.3. Science de la complexité, système complexe et évènements rares**

#### **2.3.1. Science de la complexité et système complexe**

La science de la complexité est une discipline qui n'est apparue qu'au cours de la dernière moitié du 20<sup>e</sup> siècle et qui s'intéresse à l'étude des systèmes complexes (McMillan, 2008). C'est une science qui prend de l'ampleur depuis la création du « *Santa Fe Institute* » dans les années 80 et qui est un centre qui explore les théories de cette discipline (Pascale, 1999). Elle recadre la vision faite sur les systèmes qui ne sont que partiellement compris par les connaissances scientifiques traditionnelles (Zimmerman et al., 1998).

McKelvey (2004) soutient que deux écoles de pensée ont été développées pour cette science : l'école européenne et l'école américaine. La première se base principalement sur la science physique fortement soutenue par les mathématiques et la seconde s'appuie sur la science de la vie, les sciences sociales et la théorie du chaos. La complexité fait référence au degré de difficulté pour prédire avec précision, les comportements futurs d'un système (Fischi et Nichiani, 2015). Jensen et Aven (2018) soulignent que leur défi majeur en gestion des risques est que les connaissances au niveau du système sont insuffisantes même s'il existe de grands acquis au niveau de ses composants.

Dans le contexte du marché actuel, les organisations sont considérées comme des systèmes complexes sous l'appellation « *Complex Adaptive System (CAS)* » ou Systèmes adaptatifs complexes (Bohórquez Arévalo et Espinosa, 2015; Byrne et Callaghan, 2013; Daryani et Amini, 2016; McMillan, 2008; Reiman et al., 2015; Zimmerman et al., 1998). Le terme « *Complex System* » ou système complexe est défini tel que précédemment discuté. Le terme « *Adaptive* » ou adaptatif signifie que le système a la capacité d'alterner ou de changer, la capacité d'acquérir de l'expérience (Zimmerman et al., 1998). Cette nécessité pour que les organisations s'adaptent est causée par la complexité de l'environnement dans lequel elles évoluent (Bohórquez Arévalo et Espinosa, 2015; Byrne et Callaghan, 2013). Or, comme mentionné dans la problématique de cette étude, la gestion du risque traditionnelle est inefficace pour gérer l'incertitude des perturbations dans les systèmes complexes. Par conséquent, il y a lieu de poursuivre davantage les réflexions sur les possibilités d'évitement des événements nuisibles sur les actifs ainsi que leurs phénomènes de cascade au sein de ces systèmes.

Basée sur Jensen et Aven (2018), la définition d'un système complexe est vue comme suit :

« *Un système complexe est un système où les connaissances sur les causes et les conséquences de ses perturbations ou comportements sont médiocres même s'il existe des connaissances approfondies sur ses composants et interactions et ce, quelque soit le nombre de ceux-ci* ».

### 2.3.2. Événements rares

Les événements rares ont été théorisés par Nassim Nicholas Taleb sous le nom « *Black Swan* » dans son ouvrage « *The black swan : the impact of the highly improbable* », publié en 2007. Ils sont classés en deux catégories à savoir ceux qui peuvent être prédits de manière imprécise et ceux qui ne le peuvent pas (Taleb, 2007). Depuis, le débat sur de tels événements constitue un sujet houleux au sein de la communauté scientifique lors des forums dédiés à la sécurité et au risque (Aven, 2015). Afin de bien saisir leur concept, le tableau 2.2 présente leur définition selon la littérature.

Tableau 2.2 - Définition d'un évènement rare

Travaux	Définition d'évènement extrême et rare
(Taleb, 2007)	Ce sont des évènements catastrophiques rares qui n'ont pas été observés auparavant dénommés cygnes noirs ou « <i>Black Swans</i> ». Ils se caractérisent par des évènements à fort impact (positif ou négatif) et hautement improbables. Ils ne peuvent être expliqués qu'après leur impact et ne peuvent surtout pas être anticipés. Ils se produisent le plus souvent dans des systèmes complexes.
(Sornette, 2009)	Ils peuvent être définis <i>via</i> le concept de Dragon-Kings. Kings, par analogie avec la richesse des rois du fait que de tels évènements sont extrêmes et aberrants. Dragon du fait qu'ils ne ressemblent à rien d'autre (rien n'a été observé de pareil avant leur apparition).
(Mendonça et al., 2009)	Ce sont des phénomènes désignés « <i>wild cards</i> » qui se définissent par des évènements peu probables à forts impacts, singuliers (sans précédent dans le passé) et dramatiques. Ils se produisent dans des environnements complexes en évolution rapide.
(OECD, 2011)	Ils sont définis par des phénomènes qui se produisent soudainement, de manière hautement perturbatrice, générant des effets d'entrainements difficiles à contrôler où une grande incertitude entoure le lieu et le moment de leur survenance.
(Catanach Jr et Ragatz, 2010; Paté-Cornell, 2012)	Ils constituent une association d'évènements dramatiques improbables connus où des circonstances imprévisibles et aléatoires engendrent leur combinaison parfaite. Cette configuration crée un effet exponentiellement plus dévastateur et inimaginable. Ils se désignent tempêtes parfaites ou « <i>Perfect Storms</i> ».

**Tableau 2.2 - Définition d'un évènement rare (suite)**

Travaux	Définition d'évènement extrême et rare
(N. Paltrinieri et al., 2012)	Ce sont des accidents atypiques. Ces derniers sont des évènements qui ne peuvent être identifiés par les processus d'analyse de risque classiques. Ceci est dû au fait qu'ils présentent des écarts par rapport aux attentes normales d'évènements indésirables ou aux pires scénarios. Ils ont une grande ampleur et une faible probabilité qui font qu'ils sont supposés ne pas appartenir aux scénarios possibles.
(Aven, 2015)	Ce sont des cygnes noirs qui se définissent comme des évènements étonnamment surprenants par rapport aux croyances/connaissances. Ils ont un impact extrême et peuvent être décrits selon trois manières différentes à savoir : inconnus inconnus (évenements totalement méconnus par la communauté scientifique), inconnus connus (inconnus pour certains, mais connus par d'autres), connus, mais jugés très improbables.
(Komljenovic et al., 2016)	Ils constituent des évènements improbables qui se définissent comme la combinaison de circonstances inhabituelles qui produisent des effets désastreux en cascade qui sont difficilement contrôlables. Ils représentent les conséquences d'une ignorance profonde sur la nature des phénomènes étudiés ou observés. Ils se produisent le plus souvent dans des systèmes complexes.
(Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017)	Ils résultent d'une combinaison particulière d'évènements uniques qui donnent lieu à des circonstances qui présentent des écarts par rapport aux conditions normales ou optimales.
(Shah et al., 2017)	Ils constituent des évènements qui ont des impacts très néfastes et qui sont très difficiles à prévoir.

Pour caractériser le concept des évènements rares et extrêmes, la synthèse des points communs du tableau 2.2 permet de les décrire comme suit :

- leur impact est désastreux et aberrant;

- la probabilité de leur occurrence est quasi nulle;
- ils se déroulent de façon imprévue;
- ils se produisent le plus souvent dans des systèmes complexes et dynamiques.

#### **2.4. Gestion du risque traditionnelle et ses lacunes au sein des systèmes**

Tout d'abord, il y a lieu de définir la notion du risque. En effet, chaque activité est assujettie à des risques. Ces derniers constituent l'effet des incertitudes sur les objectifs (ISO-31000, 2018; ISO-55000, 2014). Ceux-ci peuvent être par exemple de productivité, de réduction de pannes/défaillances, de résilience, etc. Ces incertitudes sont dues aux limites de connaissances (Bjerga et Aven, 2015).

Par conséquent, le risque est défini le plus souvent par le produit d'un préjudice par sa probabilité d'occurrence (Craig, 2018). Il représente l'évènement incertain qui agit le plus souvent défavorablement sur les choses que les humains apprécient (Florin et Bürkler, 2017). Il peut être vu comme la possibilité pour que quelque chose ayant des conséquences néfastes sur ces éléments tant appréciés se concrétise (Denning et Budnitz, 2018). Par exemple, pour une organisation, les actifs (équipements industriels, moyens financiers, ressources humaines, valeur de l'entreprise, etc.) font partie de ces éléments de valeur appréciés, car ce sont eux qui participent à sa génération d'opportunités.

Quant à la gestion du risque, elle fournit des informations pour la prise de décision en matière de risque par le biais de l'analyse et de l'évaluation du risque (Aven, 2016). Elle consiste à apporter une analyse sur les causes et les conséquences des risques pour y porter des jugements afin d'éliminer ou de réduire leur ampleur (N. Xia et al., 2018). Elle s'implique dans la pondération coût/bénéfice des mesures à adopter (Pasman et al., 2017). Il existe plusieurs outils pour la gestion du risque traditionnelle. Le tableau 2.3 illustre quelques outils pertinents de cette gestion du risque traditionnelle.

Tableau 2.3 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque traditionnelle

Outils/méthodes	Avantages	Inconvénients	Informations ou outils utilisés	Travaux connexes
AMDE (Analyse des modes de défaillances et de leur effet) ou ( <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Constitue une méthode pour identifier les défaillances potentielles d'un système où leurs criticités peuvent être incluses</li> <li>Identifie les actions de contrôle et de prévention</li> <li>Permet d'améliorer la fiabilité du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne peut pas gérer les modes de défaillances complexes</li> <li>Le mauvais classement d'un risque peut conduire à des efforts inappropriés</li> <li>Manque de prise en compte des interdépendances entre les différents modes de défaillances et leurs effets</li> <li>Temps d'analyse élevé</li> <li>Non prise en compte des erreurs humaines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Définition de la portée de l'analyse et des fonctions du système</li> </ul>	(Altabbakh et al., 2014; Fattah et Khalilzadeh, 2018; H.-C. Liu et al., 2013; Lo et al., 2019; Mechhoud et al., 2016; Yousefi et al., 2018)
HAZOP ( <i>Hazard and Operability Study</i> ) ou étude de danger et d'opérabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fournit des informations sur les risques et les problèmes liés à la continuité des opérations</li> <li>La mise à jour systémique de l'étude HAZOP permet son amélioration continue</li> <li>Est un outil de prévention</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitation des facteurs de risque (fréquence et gravité uniquement)</li> <li>Pondération égale des facteurs de risque</li> <li>L'exhaustivité de l'analyse n'est pas garantie</li> <li>Temps de mise en œuvre élevé</li> <li>Prise en compte des facteurs humains et organisationnels limitée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données de défaillances</li> <li>Brainstorming</li> <li>Paramètres du système (température, débit, pression, etc.) + mots-guides (non, plus, moins, etc.)</li> </ul>	(Baybutt, 2015; Cheraghi et al., 2019; Kościelny et al., 2017; Mechhoud et al., 2016; Meng et al., 2018)

Tableau 2.3 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque traditionnelle (suite)

Outils/méthodes	Avantages	Inconvénients	Informations ou outils utilisés	Travaux connexes
FTA ( <i>Fault Tree Analysis</i> ) Analyse arbre de défaillance	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifie le comportement du système en cas de défaillance</li> <li>Facile à interpréter et à identifier du fait de sa méthode graphique des chaînes causales</li> <li>Réalisation d'analyse de sécurité et de fiabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incapacité à traiter les données de défaillances incertaines</li> <li>Manque de prise en compte des dépendances statistiques entre les événements de défaillance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données sur les défaillances</li> </ul>	(Giraud et Galy, 2018; Henriques de Gusmão et al., 2018; Peeters et al., 2018; Yazdi et Kabir, 2017)
Arbre des événement ( <i>Event Tree</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifie l'ensemble des séquences d'événement (scénario du bon fonctionnement ou d'échec) et leur probabilité d'occurrence</li> <li>Facile à interpréter car décrit de façon graphique</li> <li>Montre tous les résultats possibles découlant d'un événement initiateur d'accident</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non prise en compte des erreurs humaines</li> <li>Temps de mise en œuvre élevé</li> <li>Incapacité de gérer les dépendances entre les événements initiateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyse de scénario</li> </ul>	(Meloy, 2006; Piadeh et al., 2018; Raiyan et al., 2017)

*Tableau 2.3 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque traditionnelle (suite)*

Outils/méthodes	Avantages	Inconvénients	Informations ou outils utilisés	Travaux connexes
Nœud papillon ( <i>Bow-tie</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en œuvre simple et pratique</li> <li>• Prise en compte des événements dangereux</li> <li>• Combine l'arbre de défaillance et l'arbre d'évènement afin d'obtenir le modèle cause à effet des événements dangereux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité limitée à gérer l'incertitude à cause de l'application des fonctions booléennes simples</li> <li>• Incapacité de modéliser des dépendances complexes entre variables</li> <li>• Application de probabilité déterministe</li> <li>• Non prise en compte des caractéristiques distinctives du système/actif (état, utilisation opérationnelle, politique d'inspection et de maintenance, etc.)</li> <li>• Non prise en compte de la dynamique du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Données précurseurs d'accidents</li> <li>• Analyse de scénarios</li> <li>• Connaissances des experts</li> </ul>	(Badreddine et Amor, 2013; F. Khan et al., 2016; Vileiniskis et Remenyte-Prescott, 2017)

L'analyse de la façon avec laquelle la gestion du risque s'effectue et sa contextualisation au sein des systèmes complexes, permettent de mieux comprendre ses lacunes au sein des systèmes complexes. Les questions historiques qui sont posées lors de l'évaluation du risque sont les suivantes, conformément à (Aven, 2017; Hosseini et al., 2016) :

- Qu'est ce qui peut mal tourner ou quels sont les évènements (perturbations, dangers ou menaces) qui vont se produire ?
- Quelle est la probabilité du scénario d'un évènement ?
- Quelles sont les conséquences de ce scénario ?

Il en résulte que l'évaluation du risque consiste à identifier l'ensemble des scénarios de perturbations (dangers ou menaces) possibles et à quantifier les risques (produit, probabilité d'occurrence d'un scénario par sa conséquence) qui leur sont associés.

Dès lors, il est question d'identifier les insuffisances de cette approche au sein des systèmes complexes à savoir : identification des perturbations et détermination du risque. En ce qui concerne les lacunes de l'identification des perturbations au sein des systèmes complexes, elles peuvent être justifiées comme suit :

- au sein des systèmes complexes, les perturbations peuvent être en grande partie inconnues (Aldunce et al., 2015; Aven, 2017, 2018; J. Park et al., 2013);
- pour ces systèmes, un effet aussi négligeable qu'il soit peut avoir des effets désastreux sur les actifs d'une organisation du fait de leur manque de linéarité et de leur forte interdépendance (Helbing, 2013; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017; Quigley et Revie, 2011; Straub et al., 2016; M. Yang et al., 2015);
- des défaillances peuvent sembler résulter pour des raisons extraordinaires (J. Park et al., 2013);
- le manque de données antérieures pour certaines perturbations et l'acceptation du risque résiduel sans pour autant définir avec exactitude leurs conséquences, remettent

également en cause la possibilité d'identification des perturbations (Bostick et al., 2018).

En ce qui a trait aux failles de la quantification du risque au sein des systèmes complexes, elles peuvent être vues comme suit :

- le renforcement des composants critiques de toutes les parties d'un système complexe formé de plusieurs interconnexions (sociale, technique et économique) et de composants face à des perturbations qui sont inconnues, devient très coûteux voire impossible et nécessitera un temps démesuré (Bostick et al., 2018; Linkov et al., 2014);
- l'incertitude qui entoure ces systèmes associés à l'imprévisibilité des perturbations rendent difficiles la compréhension et la gestion du risque (Linkov et al., 2014)
- l'approche probabiliste d'évaluation des risques présente de fortes limitations dans les systèmes complexes caractérisés par de grande incertitudes et le potentiel de surprise (Aven, 2018);
- même l'évaluation du risque des événements à faible probabilité et fort impact tels que les « *black swan* » ont montré plusieurs lacunes par rapport à la détermination de leur risque (Quigley et Revie, 2011; Straub et al., 2016; Taleb, 2007; M. Yang et al., 2015);
- la quantification de la probabilité est impossible quand les perturbations sont inconnues (Bostick et al., 2018; J. Park et al., 2013).

## **2.5. Passage de la gestion du risque traditionnelle à la gestion du risque sous incertitude**

Le développement rapide de la technologie, le changement de comportement des clients, l'émergence de nouveaux modèles commerciaux et la pression réglementaire engendrent des environnements dynamiques où l'imprévisibilité devient élevée (Davis et al., 2009). De ce fait, l'incertitude qui entoure les événements aux effets nuisibles sur les actifs devient de plus en plus grandissante au vu de la complexité de l'environnement des organisations qui sont elles-mêmes des CAS (*Complex Adaptive System*).

Des travaux ont montré qu'il existe toujours des incertitudes sur les risques qui se manifestent au sein de ces systèmes (Goodwin et Wright, 2010; Jensen et Aven, 2018; Makridakis et al., 2009). De plus, une stratégie clé de la gestion de risque traditionnelle est d'identifier les composants critiques et à les renforcer mais cette approche n'est pas toujours facile à concrétiser notamment lorsque l'environnement devient de plus en plus complexe, les interdépendances fortes et les menaces inconnues (Alderson et al., 2015; Bostick et al., 2018)

Conséquemment, les organisations évoluent dans des incertitudes profondes et donc, la gestion du risque traditionnelle n'y est plus appropriée (Slagmulder et Devoldere, 2018). Ceci est causé par le fait que cette gestion du risque traditionnelle se recentre principalement sur la connaissance des événements perturbateurs et de leurs conséquences (produit de la probabilité d'occurrence d'une perturbation par sa conséquence). C'est ce qui n'est pas évident dans le contexte précédemment mentionné. En ce sens, Aven (2017, pp. 541-542) soutient que « *the risk assessments need to see beyond the traditional risk assessment methods and highlight the knowledge and lack of knowledge aspects of risk, and not only probabilities* ».

En effet, un manque d'information/donnée ne peut pas conduire à des probabilités précises (Y. Xia et al., 2017). De plus, il y a des lacunes dans cette gestion de risque traditionnelle pour la prise de décision lorsqu'il n'y a pas de distribution de probabilité associable aux conséquences possibles des perturbations (Giang, 2015). Ainsi, il s'est avéré que l'utilisation de la probabilité n'a pu cerner tous les aspect pertinents de l'incertitude (Keynes, 2013).

L'évaluation de la gestion du risque traditionnelle s'appuie principalement sur la connaissance des perturbations, de leurs probabilités d'occurrence et des composantes du système. Or, cette stratégie devient insuffisante dans le cadre des systèmes complexes. C'est ce qui explique les lacunes de la gestion du risque au sein des systèmes complexes (Aldunce et al., 2015; Aven, 2017, 2018; Brusset et Teller, 2017; Eisenberg et al., 2014; Etinay et al., 2018; Folke, 2006; Jain, Pasman, et al., 2018; MacAskill et Guthrie, 2014;

Mentes et Turan, 2018; Ongkowijoyo et Doloi, 2018; Parker et Ameen, 2018; Patriarca, Di Gravio, et al., 2018; Zio, 2018).

Les approches de cette gestion du risque traditionnelle peuvent être contestées dans le contexte où les connaissances disponibles sont limitées ou médiocres du fait qu'elles ne fournissent pas une base solide pour une évaluation quantitative des risques (Aven et Zio, 2011). C'est ce qui conduit au recours à la gestion du risque sous incertitude puisqu'avec des incertitudes de plus en plus présentes dans les paramètres d'entrée, il faut prendre davantage de mesures pour réduire les risques (Bostick et al., 2018). Quelques outils pertinents de cette gestion du risque sous incertitude sont présentés au tableau 2.4.

Tableau 2.4 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque sous incertitude

Outils/méthodes	Avantages	Inconvénient	Informations utilisées	Travaux connexes
Analyse Bayésienne ( <i>Bayesian analysis</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intègre l'évolution temporelle des incertitudes</li> <li>• Capacité à gérer les variables multi-états, les relations de cause à effet complexes et les défaillances séquentielles</li> <li>• Permet d'incorporer une grande variété de données telles que des données extrapolées, des jugements d'experts ou des données partiellement associées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fardeau pour la construction de tables de probabilité conditionnelles</li> <li>• Faible modélisation des dépendances complexes entre variables</li> <li>• Application de probabilité déterministe ou normalement distribuée</li> <li>• Incapacité de construire les dépendances non linéaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Données sur l'augmentation des connaissances vis-à-vis des incertitudes</li> </ul>	(J. Chen et al., 2019; El-Gheriani et al., 2017; Guo et al., 2018; F. Khan et al., 2016; Yazdi et Kabir, 2017)
Fonction de perte ( <i>Loss functions</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration de la sécurité avec la qualité</li> <li>• Fournit la modélisation des pertes en temps</li> <li>• Favorise l'amélioration continue grâce à la minimisation des pertes en temps</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficile à appliquer quand les données deviennent de plus en plus rares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connaissance des caractéristiques clé du système</li> <li>• Analyse des scénarios</li> <li>• Nécessité d'indicateurs pour évaluer les écarts conduisant aux perturbations</li> <li>• Évaluation des conséquences (perte en production, actifs, santé humaine, coût,</li> </ul>	(Hashemi et al., 2014; F. Khan et al., 2016)

Tableau 2.4 - Quelques outils pertinents de la gestion du risque sous incertitude (suite)

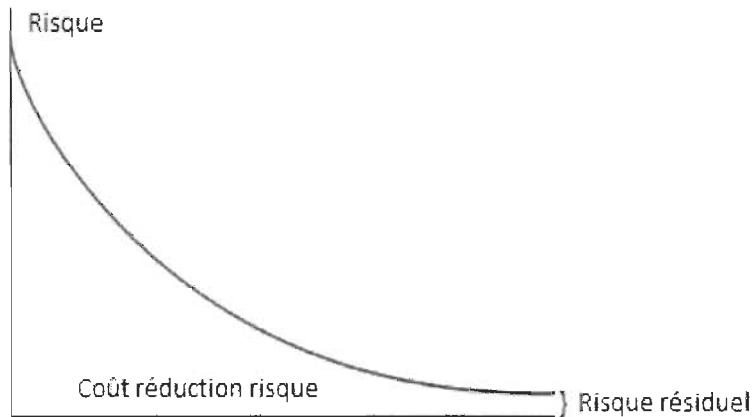
Outils/méthodes	Avantages	Inconvénient	Informations utilisées	Travaux connexes
			<p>nettoyage, environnement et qualité)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse de probabilité de scénario</li> </ul>	
Principe de défense en profondeur ( <i>Defense in depth principle or layer of protection</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle des dangers et atténuation de leurs conséquences sur les actifs vulnérables</li> <li>• Détection précoce des perturbations</li> <li>• Visualisation de la dégradation de la sécurité <i>via</i> les barrières</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S'appuie sur les modèles linéaires</li> <li>• Spécifique pour chaque système et basé partiellement sur le jugement d'expert des opérateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Information, source de danger</li> <li>• Informations sur les actifs vulnérables</li> <li>• Définition des obstacles (moyens tangibles/intangibles pour protéger les actifs vulnérables)</li> </ul>	(F. Khan et al., 2016; X. Yang et Haugen, 2018)
STAMP ( <i>System theoretic accident model and process</i> ) ou modélisation théorique des accidents et des processus d'analyses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se base sur la théorie des systèmes et la théorie de contrôle</li> <li>• Intègre les interactions du système</li> <li>• Détermine les raisons de performances humaines et les défaillances des composants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manque d'approche quantitative</li> <li>• N'intègre pas la fiabilité du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Définir les limites du système et le nombre de variables</li> </ul>	(Altabbakh et al., 2014; Bjerga et al., 2016; Meng et al., 2018)

Aux outils cités précédemment, les méthodes de prise de décision multicritères (Lo et al., 2019), le jugement d'expert (Piadeh et al., 2018) et la théorie de la décision floue (Henriques de Gusmão et al., 2018; Zhang et al., 2014) sont utilisés dans la gestion du risque sous incertitude. D'autres outils tels que la prise de décision robuste, la théorie Info-Gap, les probabilités imprécises, l'analyse de la limite de probabilité et la théorie des possibilités sont également utilisés pour apporter un traitement plus complet de l'incertitude (Shortridge et al., 2017). En outre, la combinaison des outils de la gestion du risque sous incertitude et de la gestion du risque traditionnelle est utilisée pour atténuer les failles ainsi que les incertitudes dans l'évaluation du risque.

De plus, la gestion du risque sous incertitude constitue une extension de la gestion du risque traditionnelle en contexte de manque/ignorance de données ou d'informations fiables tant sur le système étudié que sur ses perturbations (Giang, 2015; Y. Xia et al., 2017). L'incertitude qui y est traitée a trait principalement à l'incertitude épistémique et l'incertitude aléatoire. La première est due au manque de connaissance (elle peut être réduite) et inclut l'incertitude sur les paramètres/données d'une perturbation et l'incertitude liée au modèle d'analyse utilisé (Aven et al., 2013; Y. Xia et al., 2017). La seconde est associée à la nature aléatoire des perturbations (elle ne peut pas être réduite) (Aven et al., 2013; Drouin et al., 2017). Toutefois, il y a un courant de pensée qui soutient l'adoption de la gestion de la résilience pour combler les lacunes de la gestion du risque sous incertitudes au sein des systèmes complexes (Aven, 2018; Etinay et al., 2018; Jain, Pasman, et al., 2018; Linkov et al., 2014; Linkov et al., 2013; Sikula et al., 2015). C'est ce qui fera l'objet de l'étude dans les prochaines sections.

## **2.6. Passage de la gestion du risque sous incertitude à la gestion de la résilience**

Pour assurer la pérennité des organisations, il n'est plus surprenant que de nombreuses études cherchent davantage à trouver une manière de rendre les organisations plus résilientes (Slagmulder et Devoldere, 2018). Pour y parvenir, l'une des solutions passe par la résilience de leurs actifs qui sont la source de leurs créations de valeurs. La courbe de risque en fonction de ses coûts de réduction (investissement) est illustrée à la figure 2.5.



*Figure 2.5. Courbe risque =  $f$  (coût de réduction), adapté de Bostick et al. (2018)*

La courbe ci-dessus montre que le risque se représente par hyperbole lorsque l'entrée est assurée par les coûts dus à sa réduction. Elle montre également que malgré le montant des investissements qui peuvent être accordés à la réduction du risque, il existe toujours un risque résiduel dont les conséquences ne sont pas maîtrisées. Ceci constitue un inconvénient majeur car dans un système complexe, un effet aussi négligeable qu'il soit peut avoir des effets désastreux, non imaginés et inestimés sur les actifs d'une organisation du fait de leur manque de linéarité (entre les causes et leur effets) et de leur forte interdépendance (Helbing, 2013; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017; Quigley et Revie, 2011; Straub et al., 2016; M. Yang et al., 2015).

En outre, la forte interconnexion sociale, technique et économique rend les systèmes complexes plus interdépendants et par conséquent, fait que les approches de cette gestion de risques deviennent inefficaces face aux risques émergents (Aven, 2017; Bostick et al., 2018; Linkov et al., 2014; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017; Quigley et Revie, 2011; Straub et al., 2016; M. Yang et al., 2015). Les accidents surviennent dans les systèmes complexes à cause de l'incompréhension des interactions en leur sein (Jain, Pasman, et al., 2018). C'est ce qui conduit au fait que les investissements en gestion de risques continueront de croître sans pour autant assurer leur efficacité face aux incertitudes et aux surprises.

Ainsi, des causes et des conséquences imprévisibles défient de plus en plus la gestion de risques pour lesquels elle n'a pas encore de remèdes. La possibilité de surprise y devient le dilemme central (Ben-Haim, 2012). Par exemple, ces surprises se sont manifestées lors d'évènements tels que la centrale nucléaire de Fukushima (Murakami et al., 2018; Yamaguchi et Kunugita, 2018), l'attentat du 11 septembre aux États-Unis (Gin et al., 2014; Jordan et al., 2018; Schweinberger et al., 2014), la marée noire de Deepwater Horizon de BP (Simon-Friedt et al., 2016; Skogdalen et Vinnem, 2012), l'ouragan Katrina (Kantha, 2013; Labib et Read, 2015) , etc.

Une façon théorique d'atténuer ces risques qui deviennent indénombrables voire indécelables au vu de la complexité et des fortes interdépendances au sein des systèmes complexes, serait d'avoir un système capable de maintenir ses fonctionnalités à tout moment malgré l'impact des perturbations quelles qu'elles soient. C'est ce que la littérature définit par la résilience ou « *resilience* ». Elle est vue comme une approche qui intègre les incertitudes, atténue les conséquences des risques quelque soit leur prévisibilité voire imprévisibilité et améliore la capacité d'un système à se remettre d'une perturbation (Bostick et al., 2018; Linkov et al., 2014; Sikula et al., 2015).

Un système résilient est plus apte à mieux survivre lorsqu'il subit des perturbations ou des menaces surprises (Jain, Pasman, et al., 2018). Aven (2017, p. 536) soutient que « *resilience analysis and management are especially suited for confronting unknown and uncertain categories of events* ». C'est ce qui a suscité la nécessité du changement de paradigme menant de la gestion de risques à la gestion de la résilience au sein des systèmes complexes (Bostick et al., 2018; Etinay et al., 2018; Jain, Pasman, et al., 2018; Linkov et al., 2014; Linkov et al., 2013; Sikula et al., 2015).

## 2.7. Gestion de la résilience en GDA

### 2.7.1. Analyse de la résilience

Le concept de résilience est défini de plusieurs manières différentes dans la littérature. Pour avoir quelques récapitulations de ces définitions, voir (Bhamra et al., 2011; Jain, Pasman, et al., 2018; Jain, Rogers, et al., 2018; Zio, 2016). La définition du mot résilience vient du

mot Latin « *resilo* » qui signifie littéralement rebondir ou « *to leap/bounce back* » (Zio, 2016). Son utilisation courante implique la capacité d'un système ou d'une entité à revenir à son état normal de bon fonctionnement après avoir subi des perturbations (même imprévisibles).

Ses premières utilisations furent appliquées au début du 20<sup>e</sup> siècle dans le domaine de la science des matériaux (J. Park et al., 2013). Par la suite, il a été formalisé par Holling en 1973 dans le domaine de l'écologie (Holling, 1973). Il y est défini comme le maintien de l'efficacité des fonctions quelles que soient les perturbations par le biais de l'adaptation (Holling, 1973; Holling et Gunderson, 2002). Ces travaux fondamentaux de Holling ont suscité l'application de la résilience dans plusieurs disciplines notamment dans le domaine de l'ingénierie (Aldunce et al., 2015; J. Park et al., 2013).

La norme ISO 22300 définit la résilience comme « *la capacité d'assimilation et d'adaptation dans un environnement changeant* » (ISO-22300, 2018). Elle représente « *the intrinsic ability of a system to adjust its functioning prior to, during, or following changes and disturbances, so that it can sustain required operations under both expected and unexpected conditions* » (Hollnagel, 2013, p. xxxvi). C'est une approche qui met l'accent sur la préparation à l'imprévu (J. Park et al., 2013). Elle mesure le degré avec lequel un système minimise l'ampleur et la durée de ses défaillances de service tout au long de sa durée de vie nominale lorsqu'il est soumis à des conditions exceptionnelles (Butler et al., 2017).

Un exemple typique d'un système résilient est celui du corps humain dans sa capacité de se préserver à travers les infections et les traumatismes et au-delà. Même en cas de maladies graves, les fonctions vitales critiques (exemple : la respiration) sont maintenues et le corps récupère, s'adapte souvent en développant l'immunité vis-à-vis de futures attaques du même type (Aven, 2017; Linkov et al., 2014). C'est cette analogie qui est recherchée à savoir, le fait que les systèmes complexes arrivent à acquérir cette résilience observée au sein du corps d'un individu et des systèmes écologiques par le biais de la capacité d'adaptation au changement et le maintien des fonctions critiques (Aldunce et al., 2015; Linkov et al., 2014). Dans le domaine de l'ingénierie, la résilience repose sur la

préparation, l'anticipation, l'adaptation et l'apprentissage (Aldunce et al., 2015; Hollnagel et al., 2008; J. Park et al., 2013).

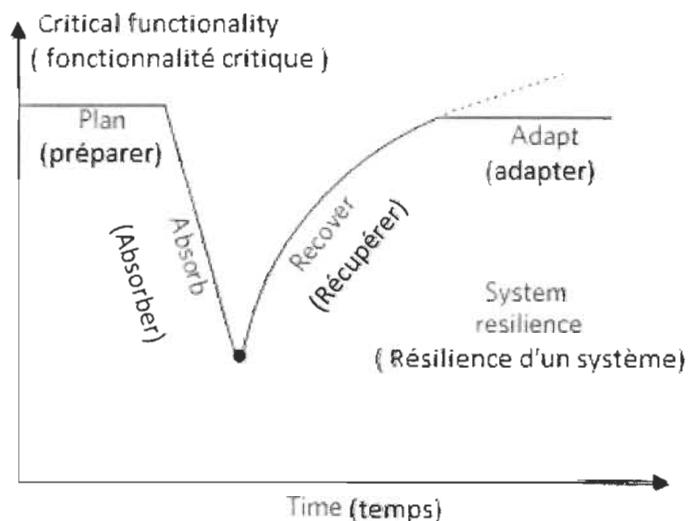
La résilience met l'accent sur la capacité d'un système à anticiper, à survivre et à se rétablir des perturbations tandis que la gestion du risque se limite à atténuer celles-ci. (Jain, Mentzer, et al., 2018). La résilience mise sur le maintien de la performance à tout moment même en cas de perte (récupération et adaptation) alors que la gestion du risque cherche à réduire la probabilité de subir des pertes (préparation et atténuation de perte) (Bostick et al., 2018). Il est judicieux d'utiliser l'analyse du risque pour prévenir les conséquences d'événements prévisibles et la résilience des systèmes pour les aider à récupérer rapidement et à s'adapter en cas d'événements prévisibles ou imprévisibles (Linkov et al., 2014).

C'est une approche qui met l'accent sur la préparation à l'imprévu (J. Park et al., 2013). Elle mesure le degré avec lequel un système minimise l'ampleur et la durée de ses défaillances de service tout au long de sa durée de vie nominale lorsqu'il est soumis à des conditions exceptionnelles (Butler et al., 2017). Par exemple, de nos jours, la définition de gestion de la résilience qui guide les agences gouvernementales américaines, est la capacité à anticiper, à s'adapter aux conditions changeantes, à résister aux perturbations, à y réagir rapidement et à s'y remettre le plus vite possible (Sikula et al., 2015).

L'un des grands défis de la gestion de la résilience réside sur le fait qu'elle est liée à l'événement (perturbation, danger ou menace) d'entrée du système étudié et au temps de récupération de celui-ci à la suite de cet événement (Haimes, 2009). Par exemple, soit un système soumis aléatoirement à deux types d'événements A et B, où il est respectivement très fortement résilient et très faiblement résilient. Si au courant de ce processus, l'entrée du système est l'événement A, il en résulte que le système peut être qualifié de très fortement résilient. Par contre, si l'entrée du système est l'événement B, alors le système peut être qualifié de très faiblement résilient. En ce moment, qu'en est-il de la résilience du système, quelle que soit l'entrée (A ou B) ? C'est sur ce point que Haimes voulait attirer l'attention en qualifiant la résilience en tant qu'une manifestation de l'état du système compte tenu de l'événement d'entrée. D'autres analyses seront tout de même nécessaires telles que la fréquence de chaque événement, la probabilité pour que l'entrée soit A ou B,

etc. Peu importe l'ampleur des approfondissements de l'analyse, ils vont se concentrer davantage sur la connaissance (au sens large) de l'évènement d'entrée et du temps de récupération du système.

Aussi, la grande attractivité de la résilience dans le domaine de l'ingénierie réside sur le fait qu'elle peut être réalisée sans la prise en compte du risque (exemple la rédundance entre les actifs : mettre en parallèle plusieurs actifs pour faire augmenter la fiabilité globale) (Aven, 2017). Toutefois, la gestion de la résilience et la gestion de risque sont deux techniques complémentaires (Aven, 2017; Jain, Mentzer, et al., 2018; Jain, Pasman, et al., 2018; Linkov et al., 2014). La résilience évalue les interdépendances entre les systèmes ainsi que les cascades d'évènements qui peuvent en découler (Bostick et al., 2018). La figure 2.6 illustre les étapes de la gestion de la résilience.



**Figure 2.6. Étape de la gestion de la résilience, source (Linkov et al., 2014)**

La figure 2.6 évoque également le processus de changement de fonctionnement durant la phase de la résilience. Le point sur la figure représente la coordonnée de la dégradation maximale lors du processus de récupération dans le cas d'une perturbation. Ce processus ne peut être observé qu'en cas d'occurrence d'un évènement déclencheur (Aven, 2017).

La résilience proposée par (Ayyub, 2014), sera définie comme suit:

*« La résilience est un processus dynamique ayant comme objectif de perdurer ou de rétablir rapidement les performances de base (fonctionnelle) d'un système dans l'incertitude de ses états et de ses perturbations par le biais de la préparation, l'absorption (capacité de contenir), la récupération et l'adaptation (apprentissage) ».*

Par conséquent, elle se traduit par la persistance du maintien des fonctions critiques ainsi que la rapidité avec laquelle un système survit d'une perturbation/menace avant, pendant et après sa concrétisation (Ayyub, 2014; Hashimoto et al., 1982). Les outils/supports pertinents de la gestion de la résilience sont présentés dans le tableau 2.5.

*Tableau 2.5 - Outils/supports pertinents de la gestion de la résilience*

Outils/support de la résilience	Avantages	Inconvénients	Informations utilisées	Travaux connexes
Redondance ( <i>redundancy</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permet de satisfaire les exigences fonctionnelles en cas de perturbations</li> <li>Augmente la fiabilité d'un système</li> <li>Ne nécessite ni la connaissance des événements perturbateurs ni la probabilité de leurs occurrences</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût est fonction de l'actif</li> <li>Nécessite la maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type de raccordement à utiliser</li> </ul>	(Aven, 2017; Peiravi et al., 2019; Xu et al., 2018)
Analyse des scénarios ( <i>Scenarios Analysis</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permet l'identification systématique des futures menaces</li> <li>Permet d'intégrer l'évolution des incertitudes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Repose sur les données et les connaissances</li> <li>Possibilité de manquer certains scénarios de risque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Résultat de l'ensemble des scénarios pour des accidents crédibles (plausibles et causant des dommages importants)</li> <li>Évaluation des dommages de chaque scénario</li> <li>Niveau du risque de l'ensemble des scénarios</li> </ul>	(Batrouni et al., 2018; Baybutt, 2018; Bostick et al., 2018; F. I. Khan et Abbasi, 2002)

Tableau 2.5 - Outils/supports pertinents de la gestion de la résilience (suite)

Outils/support de la résilience	Avantages	Inconvénients	Informations utilisées	Travaux connexes
MIRA ( <i>Military Installation Resilience Assessment</i> ) ou modèle d'évaluation de la résilience des installations militaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permet l'adaptation aux menaces inconnues</li> <li>Intègre la complexité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manque de mesure de l'efficacité de la méthode</li> <li>Nécessite un encadrement et une analogie pour des fins d'utilisation dans d'autres domaines</li> <li>La mesure de la résilience est basée sur une échelle relative</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Outils de la gestion du risque et de l'échelle de la métrique de la résilience de MIRA</li> </ul>	(Sikula et al., 2015)
PRAF ( <i>Process Resilience Analysis Framework</i> ) ou cadre d'analyse de résilience des processus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intégration des facteurs techniques et sociaux avec les dimensions de la résilience (détection précoce, conception avec tolérance aux erreurs, la récupération et la plasticité)</li> <li>Favorise la résilience globale de l'entreprise et la rentabilité à long terme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le manque de présence de faibles signaux rend la détection précoce inefficace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intégration de l'évolution des incertitudes</li> </ul>	(Jain, Pasman, et al., 2018)

Tableau 2.5 - Outils/supports pertinents de la gestion de la résilience (suite)

Outils/support de la résilience	Avantages	Inconvénients	Informations utilisées	Travaux connexes
FRAM ( <i>Functional Resonance Analysis Methode</i> ) ou méthode d'analyse par résonance fonctionnelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentration sur les fonctions nécessaires pour que le système fonctionne correctement plutôt que sur les composants du système</li> <li>Identification des dangers et des menaces</li> <li>Permet de comprendre et de visualiser comment le système est censé fonctionner</li> <li>Facilite la description des relations fonctionnelles entre les éléments du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite du temps;</li> <li>Difficulté est fonction de la complexité du système</li> <li>N'intègre pas la quantification des probabilités de succès ou d'échec du système</li> <li>Mise en place s'alourdie en fonction de la taille du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Connaissance de chaque fonction du système (activité requise pour produire un résultat : entrée, sortie, condition préalable, ressource, contrôle et temps)</li> <li>Évaluation de la variabilité de chaque fonction</li> <li>Évaluation de l'impact de la variabilité du couplage des fonctions sur les résultats (résonance fonctionnelle)</li> <li>Identification des contre-mesures</li> </ul>	(Bjørnsen et al., 2018; Herrera et Woltjer, 2010; Jensen et Aven, 2018; Patriarca, Bergström, et al., 2017; Patriarca, Di Gravio, et al., 2017; Patriarca, Falegnami, et al., 2018; Zio, 2016)

### 2.7.2. Modèle et approches quantitatives de la gestion de la résilience

Quelques approches et modèles pour la quantification de la résilience ont été proposés dans la littérature.

Soit le système complexe à deux états suivants : le bon fonctionnement (1) et la défaillance (0). Soit  $X_t$  = état du système à l'instant  $t$  avec  $t = 0, 1, \dots, n$

Une façon de mesurer la résilience de ce système peut être définie par la métrique suivante (conformément à Aven (2017) et Hashimoto et al. (1982) ) :

$$P(X_{t+1} = 1 | X_t = 0).$$

Cette expression représente la probabilité subjective pour que le système passe à l'état de bon fonctionnement (1) à l'instant  $t + 1$  sachant qu'il était défaillant (0) à l'instant  $t$ . Elle décrit la rapidité avec laquelle un système est susceptible de se remettre d'une défaillance (Hashimoto et al., 1982).

Bruneau et al. (2003) ont proposé une métrique pour mesurer la diminution de la résilience ou *resilience loss (RL)* de l'infrastructure d'une communauté après un séisme. Elle est présentée comme suit :

$$RL = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$$

avec  $t_0$  = moment du déclenchement du séisme,  $t_1$  = moment où l'infrastructure retourne à son état normal après la perturbation, 100 = qualité normale de l'infrastructure de la communauté lorsqu'il n'y a aucune dégradation (performance attendue),  $Q(t)$  = qualité de l'infrastructure au cours du séisme. RL est représenté par le triangle de la figure 2.7.

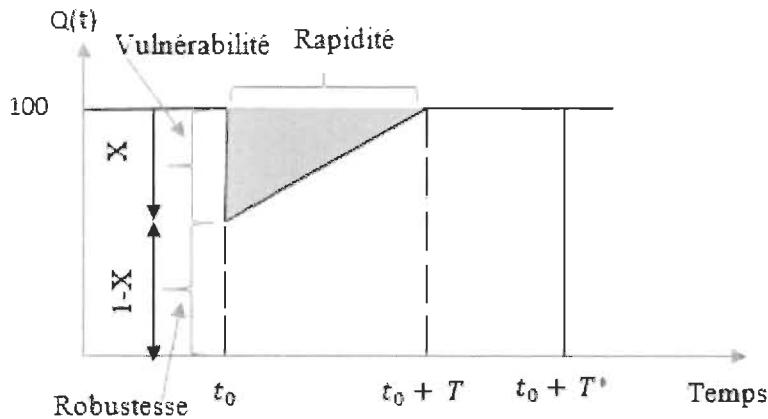


Figure 2.7. Triangle de la résilience adapté de Zobel (2011)

Zobel (2011) a proposé une métrique pour la mesure de la réduction totale possible sur un intervalle de temps suffisamment long  $T^*$  pour un seul perturbateur.

$$R(X, T) = \frac{T^* - \frac{XT}{2}}{T^*} = 1 - \frac{XT}{2T^*}$$

Sur la figure 2.7, la surface du triangle ( $0.5 \times X \times T$ ) illustre la diminution de la résilience.  $T \in [t_0, T^*]$  où  $t_0$  représente le moment de la perturbation et  $T^*$  la limite supérieure de  $T$  c'est-à-dire, délai au-delà duquel le système est considéré comme ayant une résilience nulle.  $X \in [0,1]$  représente le pourcentage de la diminution de la performance du système.

Plusieurs autres méthodologies d'évaluation de la résilience ont été abordées dans la littérature. Se référer aux articles tels que Figueroa-Candia et al. (2018); Henry et Ramirez-Marquez (2012); Jufri et al. (2019). Par exemple, Cassottana et al. (2019) ont élaboré un modèle mathématique qui décrit le processus de la phase de récupération de la résilience en la quantifiant de telle sorte que les paramètres du modèle puissent fournir des informations supplémentaires sur le comportement du système en cas de perturbation. Ce modèle donne deux caractéristiques de la fonction de récupération : la réprésentalitivité de plusieurs scénarios et l'interprétation physique des paramètres du modèle. Ce processus couvre trois éléments : (i) la perte de performance maximale (différence entre le niveau de performance cible et minimale), (ii) le degré de restauration des performances (différence entre le niveau d'état d'équilibre restauré et le niveau de performance cible avant

perturbation), (iii) temps nécessaire à la reprise. Les auteurs définissent deux types de fonction de récupération à savoir : la famille hybride de récupération et la famille gamma de récupération qui tous deux, intègrent les caractéristiques physiques du système et du processus de récupération.

A) Famille hybride de récupération :

$$MOP(t) = TP_0 - at^b e^{-ct} \text{ avec } a, b, c \geq 0 \text{ où } a, b \text{ et } c \text{ sont à estimer.}$$

(i) La perte de performance maximale représente la différence entre la performance maximale et la performance atteinte par le système après perturbation. Elle est calculée comme suit :

$$TP_0 - MOP(t_{min}) = -a(b/c)^b e^{-b}$$

(ii) Le degré de retour représente la différence entre la performance du système à son retour stable et sa performance initiale c'est-à-dire:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} MOP(t) - \lim_{t \rightarrow 0} MOP(t) = 0$$

(iii) Pour le temps nécessaire à la reprise ( $T_{rec}$ ), on suppose qu'à l'instant où la reprise est atteinte, la perte de performance cumulée devient nulle c'est-à-dire :

$$\int_{T_{rec}}^{\infty} [TP_0 - MOP(t)] dt \approx 0$$

Interprétation des paramètres :

a : mesure l'ampleur de la perte de performance. Il dépend de la robustesse (capacité d'absorption) du système et la gravité des perturbations.

b : est lié à la perte de performance et le temps de récupération. Il peut être associé aux capacités adaptatives et de restauration de haute performance du système.

c : est lié à l'ampleur dans le temps pour des taux de perte de performance dans le temps et pour des taux de perte et de restaurations fixe. Il peut être associé aux capacités d'absorption du système.

B) Famille gamma de récupération :

$$MOP(t) = TP_0 - a[\Gamma(d + 1) - \Gamma(d + f(t|b, c))] \quad \text{avec } a, b, c, d \geq 0$$

où :

$\Gamma(d) = \int_0^{\infty} t^{d-1} e^{-t} dt$  est la fonction gamma;

$f(t|b, c)$  = est une fonction monotone décroissante pour le modèle gamma, où à  $t = 0$ ,  $f(t|b, c) = 1$  et  $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t|b, c) = 0$

(i) La perte de performance :  $TP_0 - MOP(t_{min}) = a[\Gamma(d + 1) - 0.8856]$

(ii) Le degré de retour :  $\lim_{t \rightarrow \infty} MOP(t) - \lim_{t \rightarrow 0} MOP(t) = -a\Gamma(d)(d - 1)$

(iii) Temps de reprise : si  $f(t|b, c)$  est inversible (bijective),  $T_{rec} = f^{-1}(\varepsilon|b, c)$

avec  $0 < \varepsilon < 1.4616 - d$

Interprétation des paramètres :

Les paramètres a, b et c sont définis tel que mentionné pour la famille des fonctions hybrides.

d : caractérise le degré de retour des performances.

#### 2.7.3. Lien entre gestion du risque et gestion de la résilience

Pour se situer sur ce lien, la connaissance des aspects sur lesquels s'attaque la résilience est nécessaire. D'après Aven (2017), la plupart des analyses de la résilience cherchent à répondre à la question suivante :

- Quelles sont les conséquences si un évènement (perturbation, menace ou dangers) se concrétise : le système pourrait-il récupérer (se rétablir tout en maintenant la fonctionnalité de ses fonctions critiques) ? Et avec quelle rapidité en terme de temps ?

La remarque qui est observée est que la gestion du risque se concentre sur la préparation et l'atténuation du risque tandis que la gestion de la résilience s'attaque à ce qui s'ensuit si la gestion du risque n'arrive pas à faire face aux perturbations en misant sur la récupération et l'adaptation du système. Ainsi, la résilience met l'accent sur la capacité d'un système à anticiper, à survivre et à se rétablir des perturbations tandis que la gestion du risque se limite à atténuer celles-ci (Jain, Mentzer, et al., 2018). La résilience mise sur le maintien de la performance à tout moment même en cas de perte (récupération et adaptation) alors que la gestion du risque s'appuie plutôt sur la probabilité de subir des pertes (préparation et atténuation, perte) (Bostick et al., 2018).

Il est judicieux d'utiliser l'analyse du risque pour prévenir les conséquences d'évènements prévisibles et la résilience des systèmes pour les aider à récupérer rapidement et à s'adapter en cas d'évènements prévisibles ou imprévisibles (Linkov et al., 2014). En d'autres termes, la gestion du risque et la gestion de la résilience sont deux stratégies complémentaires (Jain, Pasman, et al., 2018; Linkov et al., 2014; J. Park et al., 2013). Sur ce, Aven (2018) souligne que l'appel pour passer de la gestion du risque au profit de la gestion de la résilience montre la nécessité de développer l'analyse de la résilience, mais cette complémentarité reste indispensable. Ces deux approches sont appelées à travailler de concert pour pouvoir protéger adéquatement les systèmes complexes (J. Park et al., 2013).

## 2.8. Conclusion

Ce chapitre a permis de faire connaître l'état de connaissance des principaux concepts susmentionnés dans l'introduction. Il a de même contribué à faire ressortir les lacunes mises en causes dans les systèmes complexes qui ont induit le changement de paradigme pour passer de la gestion du risque traditionnelle vers la gestion du risque sous incertitude pour déboucher vers la gestion de la résilience. Sur cette base, le chapitre suivant aura comme objectif de développer la méthodologie pour l'élaboration d'un cadre de prise de décision sous risque, incertitude et résilience.

## CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

### 3.1. Introduction

Ce chapitre a comme objectif de montrer les différentes étapes de la méthodologie afin de permettre le développement d'un modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience. Il permettra également l'élaboration d'un cadre de gestion de la résilience. Les objectifs visés seront rappelés. Les détails de chaque étape y seront également illustrés.

### 3.2. Rappel des objectifs

La finalité de cette méthodologie est d'arriver à élaborer un modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience et un cadre de gestion de la résilience applicable aux systèmes complexes. Sur ce, les objectifs de cette étude sont listés ci-dessous en tant que rappel :

#### *Objectif général*

Développement d'un modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience intégré à la gestion des actifs et adapté aux systèmes complexes.

#### *Objectifs spécifiques*

- Mettre au point un algorithme pour l'adoption du modèle de prise de décision.
- Développer un ensemble de principes et d'approches d'augmentation de gestion de la résilience qui complètent la gestion de risque dans le contexte des systèmes complexes.
- Mise en application du modèle de prise de décision élaboré en contexte du réseau de distribution électrique d'Hydro-Québec

### 3.3. Structure de la méthodologie

Pour parvenir à atteindre les objectifs mentionnés ci-dessus, la méthodologie adoptée est une approche qui se scinde en trois étapes à savoir :

- élaboration d'un cadre de prise de décision qui a pour but d'orienter le choix sur la stratégie la plus adaptée parmi la gestion du risque traditionnelle, la gestion du risque sous incertitude et la gestion de la résilience pour assurer une meilleure protection des actifs face aux perturbations. Il s'appuiera essentiellement sur les informations/paramètres pertinents qui caractérisent les systèmes et leurs perturbations. Une revue des situations et des informations où chacune desdites stratégies furent utilisées permettra de caractériser les portraits théoriques des systèmes et des types de perturbation qui leur sont associables.

Une définition de la nature des systèmes et de leurs perturbations contribuera à la reconnaissance de leurs paramètres/informations pertinents qui orientent le choix sur chaque stratégie. La recherche des lacunes qui ont trait à chacune de ces stratégies ainsi que les causes qui engendrent la nécessité de passage d'une stratégie à l'autre sont abordées. Cet algorithme fournira un processus décisionnel qui supporte la prise de décision en contexte de la gestion des actifs au vu de la conjoncture de l'évolution des systèmes et des incertitudes face aux perturbations;

- élaboration d'approches de la gestion de la résilience par le biais d'une synthétisation et d'une combinaison de concepts qui participent à l'augmentation de la résilience d'un système. Ces approches qualitatives sont des principes issus de différents domaines de la littérature qui guident sur la manière de procéder pour gérer et/ou augmenter la résilience. Cette dernière peut être vue comme un concept global qui regroupe plusieurs concepts qualitatifs (Henry et Emmanuel Ramirez-Marquez, 2012; Jufri et al., 2019);

Une catégorisation de principes génériques sur la gestion de la résilience fournira un éventail d'approches applicables dans le domaine de l'ingénierie. Par la suite, une synthétisation de ces principes dans un domaine spécifique, en l'occurrence celui des réseaux électriques, s'ensuivra. L'analyse, la combinaison et le recours à des analogies sur ces principes permettront de fournir une approche robuste qui permettra de développer un cadre de gestion de la résilience.

Une fois les approches de résilience dans le réseau électrique obtenues, leur classification permettra de reconnaître les actions à préconiser en fonction des horizons temporels. En plus, allier la gestion des actifs avec la gestion de la résilience permet une meilleure distribution des ressources disponibles et, un équilibre entre les évènements à considérer, les coûts, les risques et les opportunités;

- Mise en application du cadre de prise de décision développé par le biais d'une analyse coût-avantages des approches les plus viables sur les lignes de distribution d'Hydro-Québec. La figure 3.1. suivante illustre la structure de la méthodologie.

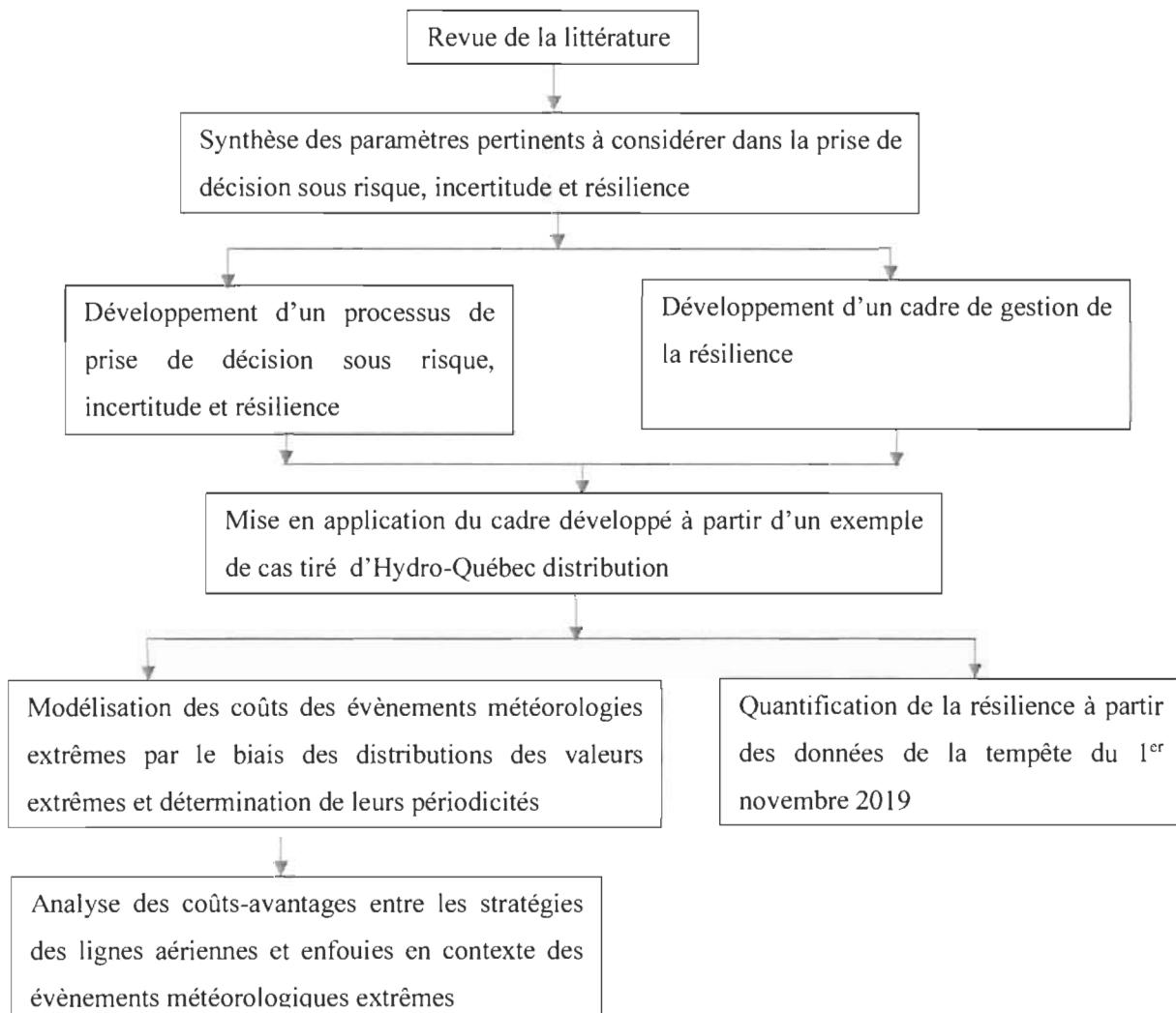


Figure 3.1. Structure de la méthodologie

Sur la figure 3.1, la quantification de la résilience est réalisée à partir des données historiques de l'évolution des interruptions des clients lors de la tempête du 1<sup>er</sup> novembre 2019. Elle est par la suite obtenue par la programmation sur Matlab via les fonctions « fitting ». Elle a pour but de combler les lacunes de la quantification de la résilience dans la littérature. L'analyse des coûts-avantages de la stratégie d'avoir des lignes aériennes ou enfouies s'est basée sur l'évaluation des coûts dus aux pannes majeurs causés par les phénomènes météorologiques extrêmes, et des coûts et caractéristiques spécifiques à chacune de ces deux stratégies.

### **3.4. Conclusion**

Ce chapitre a permis d'expliciter la méthodologie. C'est sur sa base que se fondera les prochaines étapes. Ainsi, il sera question dans le chapitre suivant d'aborder la conception du modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience, et du cadre de gestion de la résilience.

## **CHAPITRE 4 - Conception du modèle de prise de décision et du cadre de gestion de la résilience**

### **4.1. Introduction**

Ce chapitre a pour objectif de montrer les étapes de conception du modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience, et du cadre de gestion de la résilience. Il présente les paramètres pertinents sur les portraits des systèmes et des perturbations qui permettront d'élaborer ce modèle de prise de décision. Les approches qui influent sur un cadre de gestion de la résilience seront également abordées. D'autres approches qui orientent sur les stratégies de la résilience en fonction des horizons temporelles seront également discutées.

### **4.2. Algorithme du modèle de prise de décision**

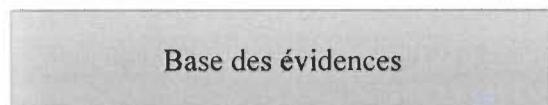
Cet algorithme a pour objectif d'aider la prise de décision sur le choix de la stratégie à opter entre la gestion du risque traditionnelle, la gestion du risque sous incertitude et la gestion de la résilience afin de faire face aux perturbations susceptibles d'être subies par un système d'actifs. D'après Modarres (2016), les quatre éléments essentiels de l'analyse des risques sont : l'identification des dangers et leur réduction si possible, l'évaluation, la gestion et la communication des risques. Malgré son développement, des lacunes orientées sur des questions telles que la compréhension, la description des risques et l'utilisation de l'analyse des risques dans la prise de décision et ce, au vu de l'évolution des systèmes et des incertitudes, ont été soulignées (Aven et Zio, 2014). Cette section cherche à soutenir la prise de décision en gestion des actifs en ce qui se rapporte au choix de la stratégie à opter parmi les éléments à savoir : la gestion du risque traditionnelle, la gestion du risque sous incertitude et la gestion de la résilience.

Selon Hansson et Aven (2014), la prise de décision en matière de risques se scinde en cinq éléments à savoir : base des évidences scientifiques, base de connaissances, évaluation globale des risques, revue & jugement de la direction puis la prise de décision.

L'algorithme en question cherche à mettre tous ces aspects dans une relation logique en tenant en compte de l'évolution des systèmes et des perturbations. Pour y aboutir, il est essentiel de détailler et de décortiquer chacune des étapes qui composent la prise de décision en gestion des actifs et de les contextualiser dans l'évolution des systèmes et des incertitudes.

#### 4.2.1. Construction de la base des évidences

Elle constitue la première étape pour fonder la base de connaissances sur laquelle doit reposer l'évaluation des risques. La figure 4.1 représente la première étape de l'algorithme.



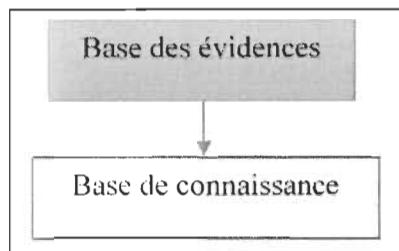
*Figure 4.1. Base des évidences dans la prise de décision*

De ce fait, comment faire alors pour obtenir/construire la base des évidences?

Selon Aven (2016), la construction de la base des évidences s'obtient sur la base de la collecte des données et des informations recueillies lors de l'essai/l'analyse des phénomènes/systèmes. C'est elle qui contribue à la création d'une base de connaissances (Aven et Kristensen, 2019). Soit comme exemple un camion de transport. Dans ce cas, la base des évidences aura comme objectif de réunir l'ensemble des informations sur ce système et ses perturbations qui vont nuire ou participer au bon fonctionnement de cet actif. Par conséquent, il s'agira par exemple d'estimer la durée de vie optimale des composantes qui pourront mettre le camion en arrêt au cours d'une livraison, de définir l'ensemble des perturbations qui peuvent limiter sa libre circulation, de déterminer les trajets qui pourront augmenter le risque d'accident ou influencer négativement sur les aspects organisationnels et économiques, etc. Il peut également s'agir de faire des simulations à partir des données historiques pour obtenir les meilleurs modèles sur les coûts, l'ordonnancement des livraisons ou les études de fiabilité. C'est pour cela que la base des évidences s'acquière par la pratique, l'expérience et la recherche (Aven et Kristensen, 2019).

#### 4.2.2. Base de connaissances

L'évaluation des risques repose sur plusieurs aspects dont la plus importante est la base de connaissances. Elle constitue la deuxième étape du processus de prise de décision en gestion des actifs. La figure 4.2 présente cette étape dans le processus de prise de décision.



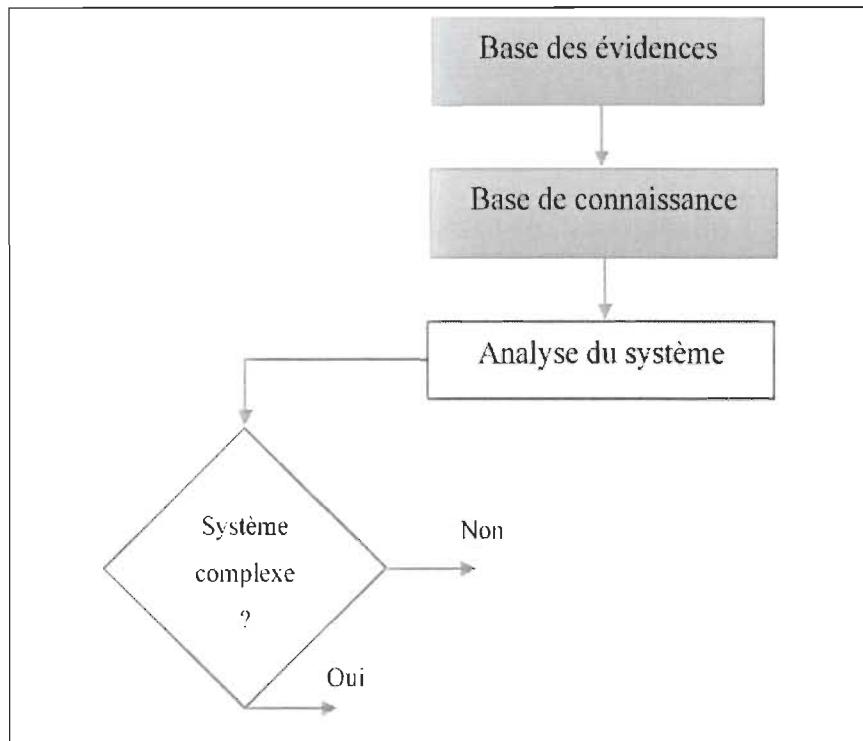
*Figure 4.2. Base de connaissances*

Comment définir une base de connaissances en contexte de l'analyse des risques ?

L'interprétation d'une base de connaissances doit être effectuée dans le contexte des connaissances scientifiques générales (Aven, 2016). Les connaissances sur les conséquences sont réparties en connaissances générales et spécifiques (Aven et Kristensen, 2019). Les premières couvrent les connaissances disponibles en ce qui concerne les activités connexes du système/perturbation, la connaissance des facteurs/conditions spécifiques pour comprendre et gérer les risques liés au système. Elles fournissent les connaissances générales des indicateurs sur la nécessité d'évaluer les risques et sur le type de leur évaluation y compris les modèles et les méthodes à utiliser. La seconde couvre les connaissances qui visent la spécification du système et des perturbations en tenant compte de leur contexte et de leur condition opératoire. Reprenant l'exemple du camion de transport, il s'agira de répondre aux questionnements suivants par le biais des connaissances scientifiques et spécifiques acquises à travers la base des évidences: comment le taux d'accident varie avec la durée de sommeil du conducteur ? Quel est le temps de retard du camion qui pourrait affecter lourdement le système organisationnel et économique des parties prenantes ? Quels sont les événements qui pourront nuire à la libre circulation du camion ? Quel est le meilleur équilibre entre les bénéfices obtenus sur son niveau de chargement, ses risques et ses coûts de transport ? Etc.

#### 4.2.3 Analyse du système

Au vu de l'évolution des systèmes, des incertitudes ont émergé au sein de ceux-ci et remettent en cause plusieurs aspects de leurs caractérisations et leur compréhension. De ce fait, l'analyse du système constitue la troisième étape du processus de prise de décision et est présenté à la figure 4.3.



*Figure 4.3. Analyse du système*

Dans ce contexte, sur quel paramètre/aspect/information doit être évalué un système ?

Il existe deux types de systèmes qui seront considérés dans ces évaluations à savoir les systèmes considérés comme linéaires et les systèmes complexes. Pour ces derniers, ce sont des systèmes qui peuvent avoir, au-delà des états de défaillance et de bon fonctionnement, d'autres états multiples qui affectent leur comportement (Mi et al., 2018). Ils comportent des interdépendances non linéaires et complexes entre leurs composants (Ladyman et al., 2013; Mi et al., 2018). Tel qu'indiqué à la section 2.2, sur la base de Jensen et Aven (2018), la définition des systèmes complexes est vue comme suit : « *ce sont des systèmes où les connaissances sur les causes et les conséquences de leurs perturbations ou leurs*

*comportements sont médiocres même s'il existe des connaissances approfondies sur leurs composants et leur interactions et ce, quelque soit le nombre de ceux-ci ».*

Quant aux systèmes considérés comme linéaires, ce sont des systèmes où les défaillances des composants sont vues par rapport à leurs conséquences sur la fonction du système (Zio, 2009). Cela conduit au fait que dans ces systèmes, une connaissance approfondie des sous-parties (composants) du système mènent à une connaissance approfondie sur le système dans sa globalité (Aven et Zio, 2011). Il existe un lien de causalité entre les entrées (perturbations) et les sorties (conséquences) du système. C'est-à-dire que ce sont des systèmes dans lesquels il existe une forte corrélation entre défaillances du système et défaillances de ses composants (Zio, 2009).

Pour l'exemple du camion de transport, il peut être considéré comme un système d'actifs composé par son système technique, organisationnel, social et économique. Dans ce cas, le système technique peut être son schéma cinématique, ses modes de fonctionnement, ses limites d'utilisation, etc. Son système organisationnel concerne sa chaîne de logistique, la planification de sa maintenance, le suivi de ses bons d'entretien, etc. Son système social a trait aux impacts directs ou indirects des perturbations sur les services du camion sur la société. Il peut s'agir par exemple de l'impact de l'interruption ou d'un long arrêt des services du camion pour la communauté. Son système économique est l'apport pécuniaire des services du camion pour ses parties prenantes. L'analyse du « système d'actifs du camion » est faite par l'analyse de l'impact des perturbations des services du camion sur la vie économique, sociale et organisationnelle de l'entreprise qui le détient. Est-ce que les conséquences des perturbations sur le fonctionnement du camion peuvent être à fort impact sur la vie économique, sociale, organisationnelle et économique d'une société en plus de soulever des défis techniques énormes. On peut y répondre par non. Par conséquent, un camion de transport est un système linéaire. Si l'exemple était le réseau du système de santé, il serait un système complexe. Pour y voir clair, il suffit juste d'observer le fort impact de la perturbation de la maladie à coronavirus de 2019 qui sévit à l'heure actuelle sur les structures critiques de la société.

En outre, les systèmes modernes sont affectés par des incertitudes qui affectent leurs analyses selon les manières (Zio, 2009) à savoir :

- leur représentation et leurs modélisations;
- la quantification de leur modèle;
- leur propagation et la quantification de leurs incertitudes dans leur comportement.

Les éléments qui contribuent à la génération d'incertitudes sont les suivants (Zio et Aven, 2011) :

- manque d'informations (ou de connaissances) : il constitue le pilier principal de la source d'incertitude. Il est engendré par l'absence d'informations, de connaissances ou de données sur ce qui est étudié que ce soient les phénomènes, systèmes ou évènements. Il peut être réduit par le biais de l'augmentation de la connaissance;
- approximation : il se traduit par l'attribution de valeur spécifique à des paramètres incertains ou la représentation d'un système/phénomène par un modèle simplifié;
- abondance d'informations (ou de connaissances) : elle est causée par la concentration de l'analyste sur les paramètres qui lui semblent être importants et néglige les autres. Elle est causée par l'incapacité de l'être humain à traiter ou assimiler simultanément un nombre important de paramètres;
- caractère contradictoire d'informations/données : il est engendré par le fait que certaines informations puissent se traduire par un phénomène ou une explication donnée alors que d'autres données illustrent un phénomène ou une explication inverse à celles invoquées. Cette situation est causée par les erreurs de mesures de certaines variables ou le manque de représentativité des modèles utilisés.
- erreurs de mesure : la mesure des grandes est affectée par les précisions des appareils de mesure;

- ambiguïté linguistique : elle se traduit par la difficulté d'un analyste à cerner tous les aspects de l'interprétation de l'assignation de certains termes utilisés dans diverses circonstances par un autre analyste;
- subjectivité des jugements des analystes : elle est due au fait que chaque analyste interprète les informations selon son niveau de connaissances au sens large (compétence, expérience ou croyances).

#### 4.2.4. Évaluation de la base de connaissances

Chaque stratégie sélectionnée pour assurer la protection des actifs devrait reposer sur une base de connaissance solide. Par conséquent, dans le contexte de l'évolution des systèmes et des incertitudes, comment évaluer une base de connaissances ?

D'après Flage et Aven (2009, pp. 13-14), la base de connaissances peut être évaluée selon les lignes directives proposées comme suit :

a) Incertitude significative

Une ou plusieurs des conditions suivantes sont remplies :

- les phénomènes impliqués ne sont pas bien compris; les modèles sont inexistant ou connus/supposés donner de mauvaises prévisions;
- les hypothèses retenues représentent de fortes simplifications;
- les données ne sont pas disponibles ou ne sont pas fiables;
- il y a un manque d'accord/de consensus parmi les experts (les auteurs des articles scientifiques ou des experts adhocs de renommée)

b) Incertitude mineure

Toutes les conditions suivantes sont remplies :

- les phénomènes impliqués ne sont pas bien compris; les modèles utilisés sont connus pour fournir des prédictions avec la précision requise;
- les hypothèses retenues sont considérées comme très raisonnables;
- il existe beaucoup de données fiables disponibles;
- il existe un large accord parmi les experts.

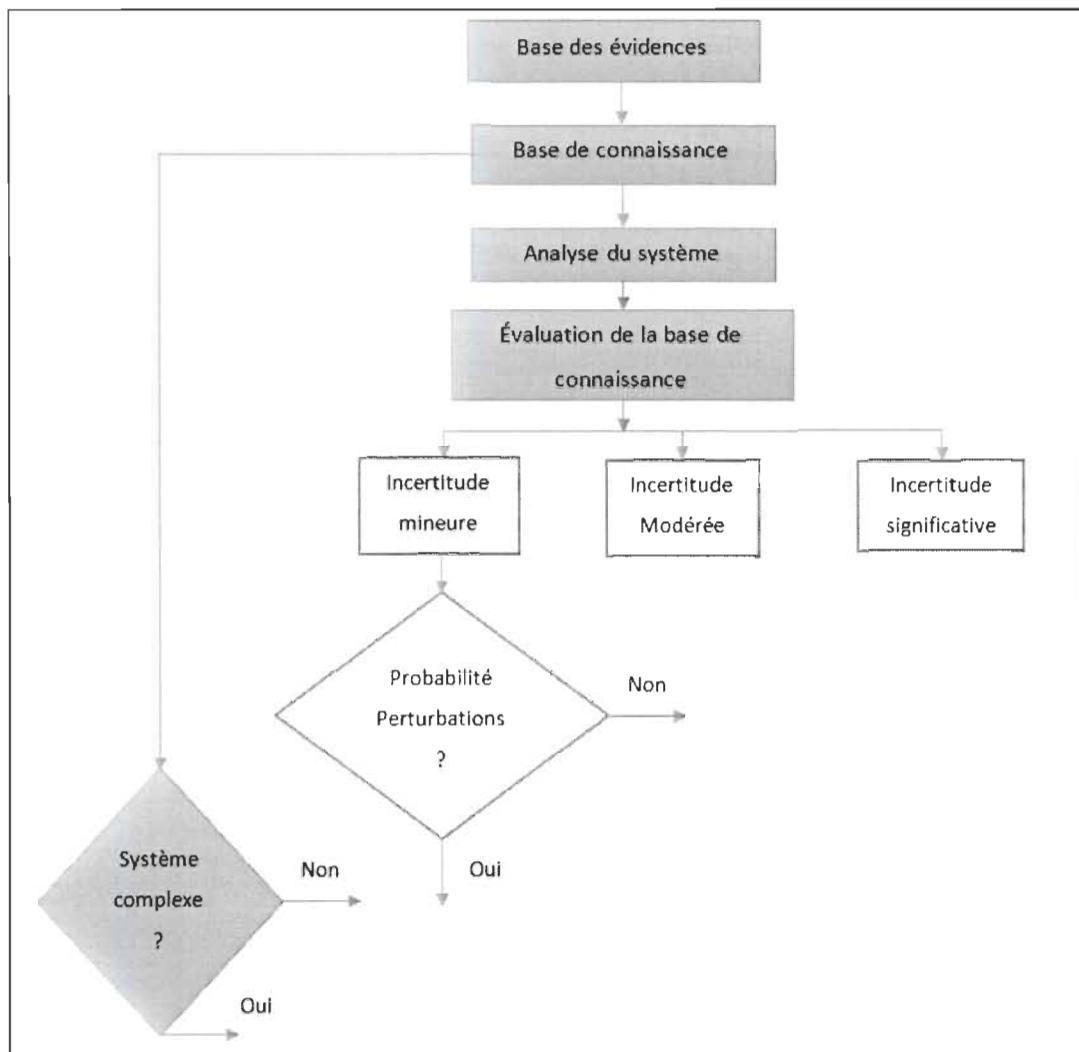
c) Incertitude modérée

Combinaison entre les conditions qui caractérisent les incertitudes significatives et mineures. Par exemple, selon les auteurs, il peut s'agir :

- des phénomènes impliqués qui sont bien compris, mais les modèles utilisés sont considérés comme simples/bruts;
- il n'existe que quelques données fiables disponibles.

Le degré de sensibilité des hypothèses doit être pris en compte pour chaque incertitude. Il représente l'ampleur des conséquences en cas de violation d'une hypothèse (Shortridge et al., 2017). Par exemple, si les coûts de dommages associés aux changements climatiques sont considérés comme fixes sur la base de l'hypothèse et qu'il n'y a pas de variabilité sur les changements climatiques alors, en cas de grand changement sur la variabilité et l'ampleur des changements climatiques, il y aura une grande sensibilité sur les coûts qui leurs sont associés.

En reprenant l'exemple du camion de transport, l'analyse de la base de connaissances consisterait à chercher à se positionner parmi les directives de son évaluation susmentionnée. C'est-à-dire vérifier les informations acquises dans la base de connaissances et les comparer avec la revue de la littérature afin de pouvoir statuer sur le niveau d'incertitude approprié. L'évaluation de la base de connaissances constitue la quatrième étape de la prise de décision et est présentée à la figure 4.4.



**Figure 4.4. Évaluation de la base de connaissances**

En outre, l'analyse probabiliste du risque est largement la plus utilisée dans le contexte de la quantification du risque. Pour qu'elle soit utilisable, il faut qu'il existe une attribution de la probabilité d'occurrence des perturbations qui s'appuie sur les informations disponibles reposant sur une base rigoureuse. Dans ce contexte, comment attribuer les probabilités d'occurrence des événements ?

Selon Aven (2013a), il existe deux types de probabilité en gestion du risque définis comme suit :

probabilité fréquentiste : fraction relative des fois où l'évènement considéré est susceptible de se reproduire si la situation étudiée était hypothétiquement « répétée » sur un nombre infini de fois. Elle s'obtient par la construction d'un grand nombre de populations en situation similaire à celui considéré et par la génération d'un modèle de probabilité (loi suivie par une variable de la population) en supposant que celui-ci est une représentation précise de la « vraie » distribution de la population;

probabilité subjective (probabilité de connaissance ou de jugement) : est une mesure/degré de confiance (conviction) qu'un analyste a de la vérité d'une proposition particulière (réalisation de l'évènement considéré) sur la base des informations disponibles et/ou empiriques. Si la probabilité fait référence à une probabilité subjective, le terme « probabilité connue » n'a pas de sens car de telles probabilités peuvent toujours être attribuées et elles sont alors connues. Elle doit toutefois être basée sur une connaissance rigoureuse.

#### 4.2.5. Évaluation globale des risques

Elle constitue le choix entre la gestion du risque traditionnelle, la gestion des risques sous incertitude et la gestion de la résilience. Chaque choix est fonction de la caractérisation et informations sur le système et de ses perturbations. La figure 4.5 représente les stratégies d'évaluation globale des risques.

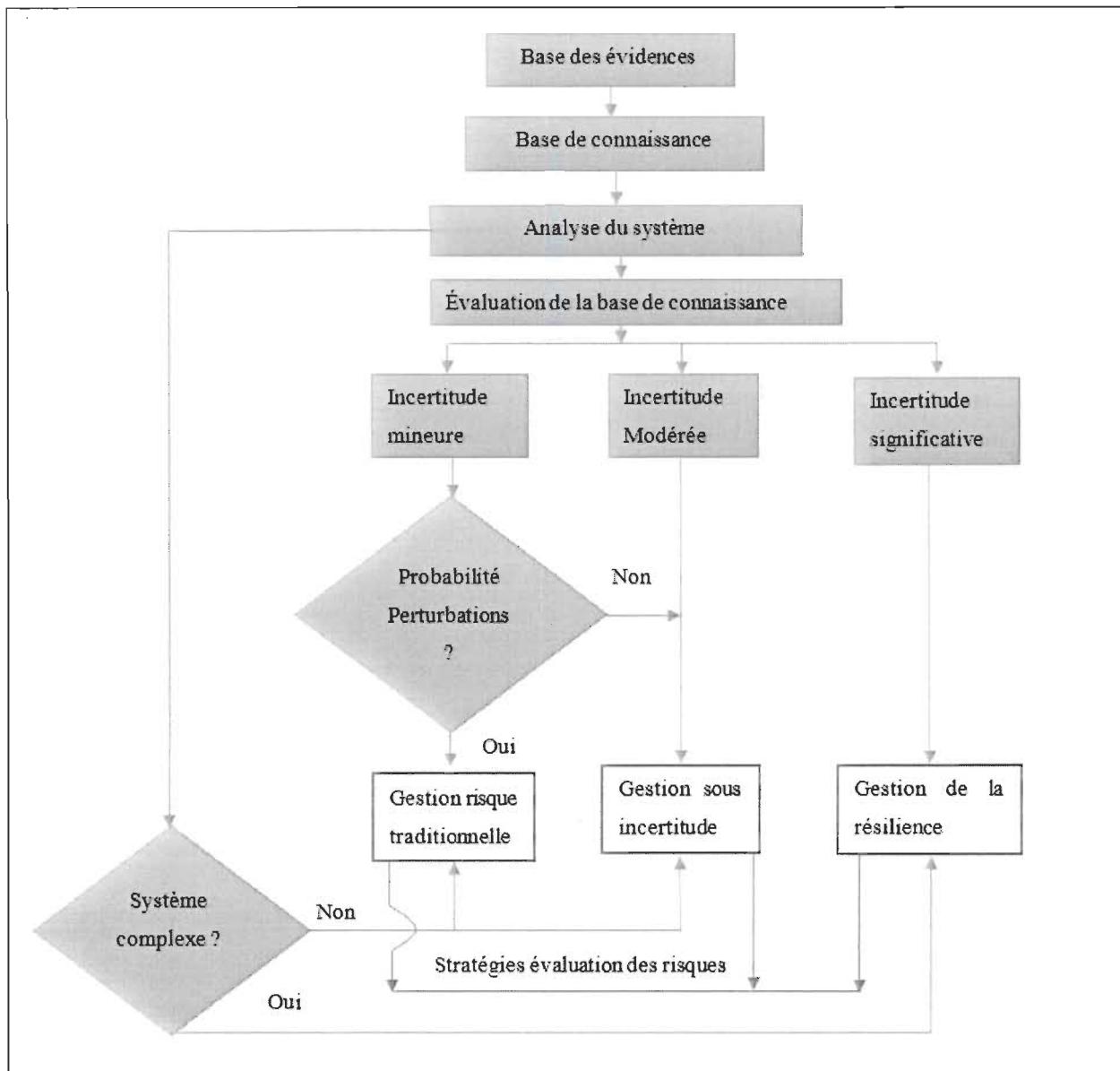


Figure 4.5. Évaluation globale des risques

En continuant sur le même exemple du camion de transport, l'évaluation globale du risque suggère d'utiliser la gestion traditionnelle ou sous incertitude dans ce contexte, puisque le système est considéré comme linéaire. Par exemple, s'il existe des distributions sur les défaillances des composantes critiques du camion, une étude de leurs fiabilités pourrait être faite dans le but de diminuer le nombre de défaillances. S'il n'y a pas de distribution disponible, une analyse bayésienne basée sur les opinions des experts pourrait être faite

pour évaluer les perturbations des services du camion. L'objectif est toujours d'assurer la bonne gestion des actifs sur les activités du camion en assurant l'équilibre entre les coûts, les risques et les opportunités.

#### *4.2.5.1. Informations pour l'utilisation de la gestion du risque traditionnelle*

- Portrait sur le système

Dans cette gestion de risque traditionnelle, l'idée de base de l'évaluation des risques est de tirer parti des informations sur les composants pour en déduire le risque au niveau du système (Zio et Aven, 2013). C'est pour cette raison que sa stratégie clef mise sur l'identification des composants critiques du système ayant le plus grand risque d'être défaillant et le renforcement/protection de ceux-ci par la suite, selon la priorité (Bostick et al., 2018). Il en ressort qu'elle est adaptée aux systèmes considérés comme linéaires.

- Portrait sur les perturbations

La gestion du risque traditionnelle est utilisée lorsque les données sur les perturbations existent et sont représentatives afin d'identifier les dangers et menaces (Jensen et Aven, 2018). Par conséquent, les perturbations y sont similaires à celles du passé et le score du niveau de risque est connu (suit une distribution qui peut être décrite de manière probabiliste ou classée sur une échelle de gravité relative) (Aven et al., 2011; Bostick et al., 2018; Clark-Ginsberg et al., 2018; Sikula et al., 2015; Straub et al., 2016; X. Yang et Haugen, 2018). Elle s'appuie sur le fait que les données historiques ou actuelles permettent de supporter une quantification robuste sur le comportement des perturbations (Zio, 2009).

- Lacunes : se référer à la section 2.4

#### *4.2.5.2. Informations pour l'utilisation de la gestion du risque sous incertitude*

- Portrait sur le système

La gestion du risque sous incertitude combine l'analyse de l'incertitude sur les paramètres de quantification du risque, l'incertitude liée aux valeurs d'entrées du

modèle et de ses hypothèses, l'incertitude due aux manques de connaissances (incertitude épistémique) et celle due aux comportements intrinsèques (incertitude aléatoire) du système (Aven et Zio, 2011; Goerlandt et Reniers, 2017; Sankararaman et Mahadevan, 2013; Shakou et al., 2019). Elle se fonde sur la logique que la gestion des risques est une question de réduction et de gestion des incertitudes sur la base de l'analyse de différents types d'incertitudes et de leur impact sur les règles et critères de décision utilisés (Nilsen et Aven, 2003; Rosqvist et Tuominen, 2004).

- Portrait sur les perturbations

En effet, selon Aven et Zio (2011), une façon classique de pallier aux incertitudes d'un système face à ses perturbations est la défense en profondeur qui se résume aux trois étapes suivantes : identification des groupes de séquence d'évènements qui conduisent à des scénarios crédibles de perturbations dans le pire des cas; prédire leurs conséquences et par la suite, mettre et concevoir des barrières de sécurité pour éviter l'occurrence de ces scénarios. L'idée derrière ce principe est que si le système est conçu pour résister à tous les pires scénarios de perturbations crédibles alors, il est considéré protégé contre toute perturbation crédible (Zio, 2009). Cette idée repose sur le fait que les connaissances sur le système et ses perturbations reposent sur une base solide de connaissances. Dans le cas où la représentation, l'analyse des incertitudes ainsi que les informations concernant le système et ses perturbations sont médiocres ou inconnues, ce principe peut être contesté inefficace (Aven et Zio, 2011). Or, c'est le cas des systèmes complexes actuels au vu de l'évolution de leur interdépendance et de leur environnement (Li et al., 2018; Mi et al., 2018; Shakou et al., 2019).

Face à cette situation, la gestion du risque sous incertitude est utilisée dans les situations suivantes (Aven et Zio, 2011; Bjerga et Aven, 2015; El-Gheriani et al., 2017; Giang, 2015; Johansen et Rausand, 2014; Mi et al., 2018; Straub et al., 2016; X. Yang et Haugen, 2018; Zio, 2009; Zio et Aven, 2013) :

- l'évaluation des risques comporte des incertitudes profondes;

- les données sur les perturbations ne sont pas représentatives (rares, peu fiables, contradictoires voire n'existent pas);
  - il existe une incapacité d'attribuer des distributions de probabilité (fréquentiste ou subjective) associable aux conséquences possibles des perturbations;
  - le recours aux données annonciatrices de perturbations majeures devient indispensable;
  - l'analyse des modèles de représentation du système et de ses perturbations repose sur une connaissance limitée ou médiocre.
- Lacunes : se référer à la section 2.5.

#### 4.2.5.3. Informations pour l'utilisation de la gestion de la résilience

- Portrait sur le système

La gestion de la résilience est utilisée dans des systèmes complexes comme discuté dans la section 2.2. Ce sont des systèmes qui peuvent appartenir aux infrastructures critiques (Zio, 2016). Ils sont caractérisés par une forte interconnexion technico-socio-économique (Mazur et al., 2019). Ce sont des systèmes dans lesquels un faible impact peut avoir de grandes conséquences (Hussain et al., 2019). Ils sont pour la plupart, des cas hautement vulnérables (Zio, 2016). Ce qui fait d'eux des systèmes dans lesquels il y a une nécessité de maintenir leurs fonctions critiques en cas de perturbations.

- Portrait sur les perturbations

La gestion de la résilience est utilisée lorsque les perturbations sur les systèmes peuvent être décrites ou analysées comme suit (Aven, 2017; Bjerga et Aven, 2015; Bostick et al., 2018; Hollnagel et al., 2008; Jensen et Aven, 2018; Johansen et Rausand, 2014; Jufri et al., 2019; Karanki et Dang, 2016; Linkov et al., 2014; Linkov et al., 2013; S. Liu, 2015; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017; Shen et al., 2018; Sikula et al., 2015; Straub et al., 2016; Walton, 2014; X. Yang et Haugen, 2018; Zio, 2016; Zio, 2018) :

- il n'y a pas de méthodes scientifiques valables pour prédire avec précision l'évolution et la distribution à long terme de la conséquence des perturbations;
  - il n'y a pas d'outils précis pour quantifier l'impact négatif des conséquences des perturbations sur la vie sociale et économique;
  - les perturbations sont hautement subversives sur les infrastructures critiques;
  - il n'y a pas d'informations disponibles pour le traitement des perturbations;
  - les perturbations peuvent être de nature émergente ou inconnue;
  - il y a une reconnaissance où les perturbations ne peuvent pas être prévenues.
- Lacunes : se référer à la problématique de cette étude.

#### 4.2.6. Revue, jugement et prise de décision

En contexte des incertitudes, il est indispensable de voir au-delà des analyses et des résultats des évaluations de risque qui peuvent être interprétés comme la revue & jugement avant de prendre une décision (Aven, 2013a). Ceci est dû au fait que ces analyses et ces évaluations reposent sur des hypothèses et une base de connaissances disponible qui peuvent contenir de nombreuses limites (Aven, 2013a). Quant à la prise de décision, elle n'est pas définitive mais plutôt adaptative en fonction de l'évolution des incertitudes et des connaissances. La figure 4.6 représente les étapes de revue & jugement et de prise de décision. Toujours sur le même exemple du camion de transport, la prise de décision sur les perturbations pouvant nuire à ses services peuvent demander des éléments plus larges que celui qui repose sur les éléments économiques et techniques. Il peut s'agir d'élargir les intervenants dans la prise de décision afin de mieux cerner la stratégie de gestion de risque envisagée. Il peut être également question d'études comparatives sur chaque stratégie à adopter afin d'évaluer, par exemple, leurs impacts sur les aspects sociaux et environnementaux.

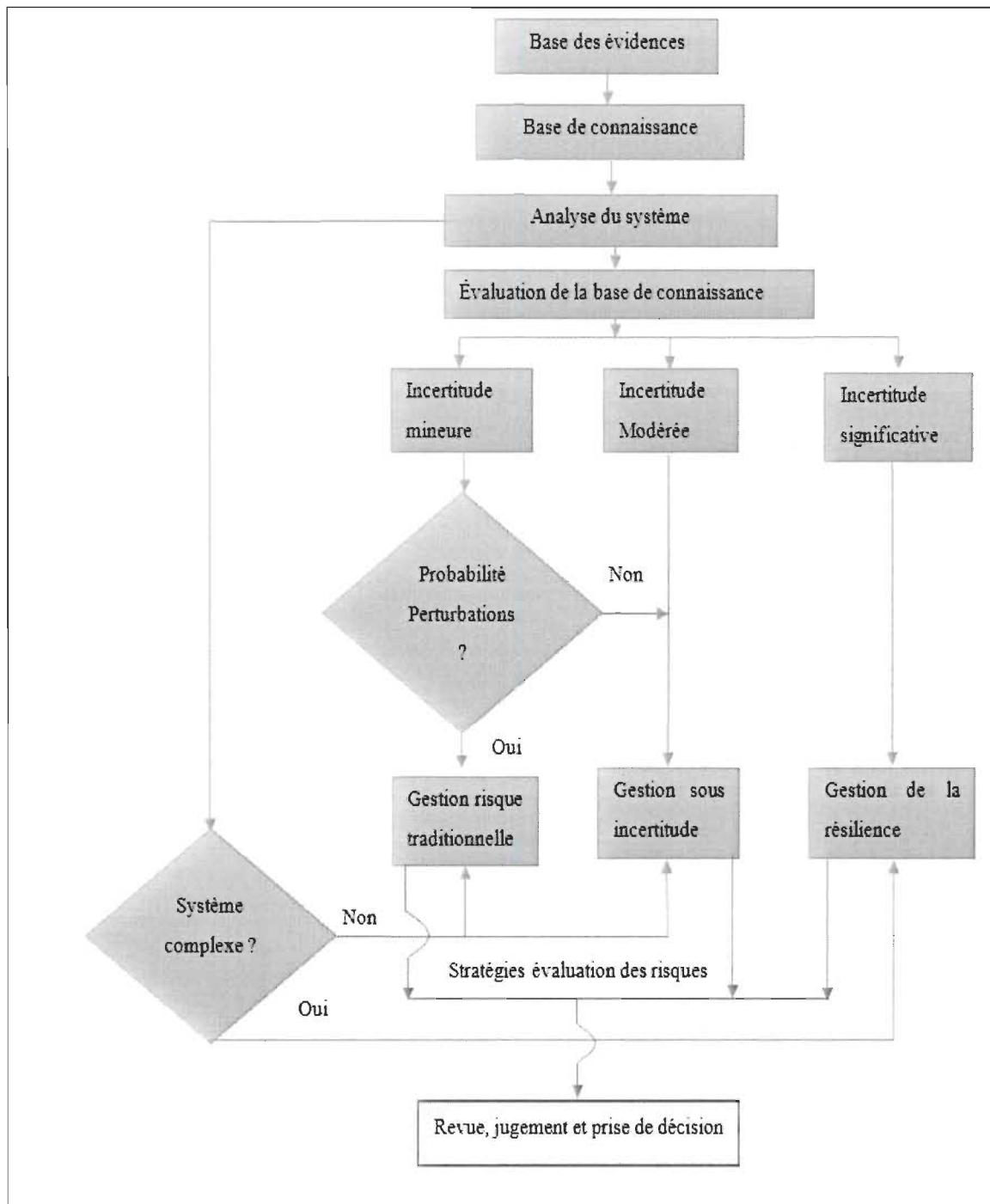


Figure 4.6. Revue, jugement et prise de décision

### 4.3. Approches génériques et spécifiques de la gestion de la résilience

Plusieurs principes d'approches existent dans la littérature. Ils sont catégorisés dans le tableau 4.1. À partir de ce dernier, un cadre générique de la gestion de la résilience est proposé à la figure 4.7. En effet, pour concrétiser un cadre, la méthodologie consiste à se baser sur la littérature, à procéder à une collection soutenue par une évaluation critique et une organisation de facteurs importants issus d'approches différentes afin de produire un résumé final et un affichage des résultats pertinents (Cardoso et al., 2014).

Par exemple, Watson et al. (2014) ont proposé un processus d'analyse de la résilience qui comprend les étapes suivantes : définition des objectifs de la résilience, définition du système et métriques de résilience, caractérisation des perturbations, détermination du niveau de leurs conséquences, définition et application d'un modèle pour le système, calcul des conséquences, amélioration de la résilience. Jain, Pasman, et al. (2018) ont développé un cadre d'analyse de la résilience des processus par le biais d'une approche qui se caractérise tel que décrit ici : intégrée, basée sur le système, axée sur les données, dynamique, rentable, quantitative et intégrant les incertitudes. Le cadre d'évaluation de la résilience proposé par Francis et Bekera (2014) est axé sur cinq composantes à savoir : l'identification du système, l'engagement des parties prenantes, la définition des objectifs de la résilience et la capacité de résilience du système. Dans cette étude, les approches seront axées sur les concepts qui soutiennent la gestion de la résilience dans le domaine de l'ingénierie notamment en contexte des réseaux électriques. Par conséquent, la résilience peut être définie comme un cadre conceptuel qui regroupe plusieurs dimensions (Jufri et al., 2019).

Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Identification du besoin d'avoir un système résilient	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure du système</li> <li>Identification de l'influence des perturbations sur le système</li> <li>Pertinence de l'analyse probabiliste des risques</li> <li>Nécessité du maintien des fonctions critiques du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Définition du système (prise en compte des composants socio-technico-économiques) et de ses interdépendances.</li> <li>Connaissance des comportements et des fonctions du système en cas d'occurrence de perturbations</li> <li>Identification des faiblesses de la PRA (<i>Probability Risk Assessment</i>) en contexte du système</li> <li>Analyse du risque de survenue de perturbations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Évaluation et estimation de la gravité des catastrophes et établissement des priorités</li> <li>Évaluation et gestion des risques des évènements extrêmes</li> <li>Étude de vulnérabilité et d'impact des perturbations sur le système</li> <li>Utilisation de FRAM (<i>Functionnal Resonance Analysis Model</i>)</li> </ul>	(Jufri et al., 2019; Lin et al., 2018; Linkov et al., 2014; Mazur et al., 2019; Patriarca, Bergström, et al., 2018)

*Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)*

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Définition de la résilience et de son objectif	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Domaine du système étudié</li> <li>• Continuité du service</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation des propriétés du système et de ses interconnexions</li> <li>• Identification des perturbations qui nuisent à la résilience</li> <li>• Description de la fonction normale du système</li> </ul>		(Francis et Bekera, 2014)

*Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)*

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Identification de typologie de résilience (définition de la résilience)	Technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement des interconnectivités (autonomie fonctionnelle et capacités alternatives du système à fonctionner en cas de perturbations)</li> <li>• Protection des éléments structurels du système</li> <li>• Cohérence entre les activités de la gestion du risque et de la gestion de la résilience</li> <li>• Contrôle des données informationnelles (disponibilité, analyse, stockage des données)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement des interconnectivités</li> <li>• Réduire le temps de recouvrement</li> <li>• Stockage d'énergie</li> <li>• Production distribuée</li> <li>• Microgrid</li> <li>• Systèmes de contrôle et de protection avancés</li> <li>• Systèmes de visualisation et d'informations avancés</li> <li>• Dégager les emprises des lignes de transport (coupe arbre/gestion de la végétation)</li> <li>• Redondance des lignes électriques</li> <li>• Décalage des courbes de fragilité vers la droite (augmenter leur résistance)</li> </ul>	(Aven, 2017; Ayyub, 2014; Bostick et al., 2018; Carpenter et al., 2001; Cerè et al., 2017; Eisenberg et al., 2014; Francis et Bekera, 2014; Hosseini et al., 2016; Linkov et al., 2014; Mazur et al., 2019; Mathaios Panteli et Mancarella, 2015; Yuan et al., 2018)

*Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)*

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Identification de typologie de résilience (définition de la résilience)	Organisationnelle et sociale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation ou maintien des performances du système</li> <li>• Implication des parties prenantes</li> <li>• Concordance dans la prise de décision</li> <li>• Communication sur les coûts, risques et opportunités de la résilience</li> <li>• Compromis entre création de valeurs et acceptation du risque</li> <li>• Partage des informations</li> <li>• Prise en compte des contraintes opérationnelles et sociales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter l'expérience et la préparation de l'équipe de gestion</li> <li>• Gestion de la demande</li> </ul>	

*Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)*

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Identification de typologie de résilience (définition de la résilience)	Économique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Équilibre entre création de valeurs et risques</li> <li>• Minimisation des pertes économiques face aux perturbations</li> <li>• Avantage-coût des solutions alternatives d'amélioration du système en terme économique</li> <li>• Réserve de fond pour la préparation et la reprise après les perturbations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation des budgets alloués au programme de résilience Minimisation des coûts de maintenance</li> <li>• Abordabilité des coûts pour les consommateurs</li> <li>• Minimisation des coûts de maintenance</li> </ul>	

*Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)*

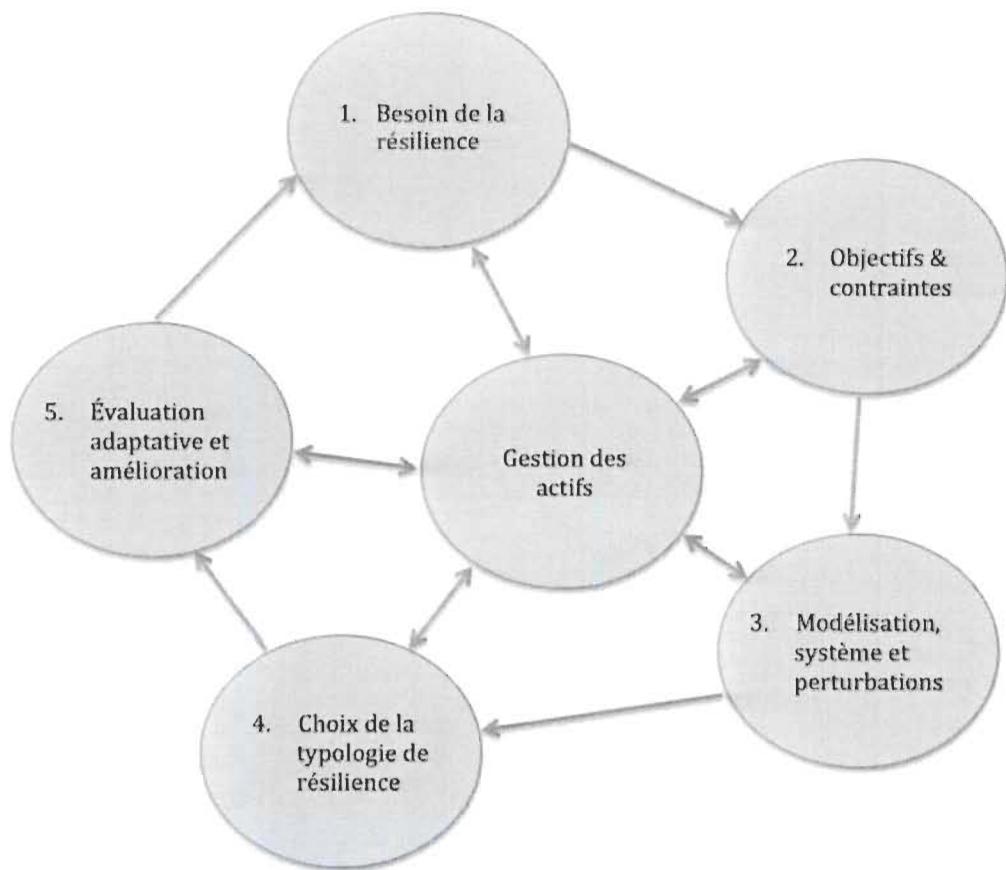
Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Identification de typologie de résilience (définition de la résilience)	Écologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réorganisation interne (changement opérationnel et comportemental qui engendre la réduction des coûts)</li> <li>• Amélioration de la reprise économique</li> <li>• Intégration des changements (rôle, formation, procédure et technologie)</li> <li>• Intégration de l'évolution du système et de son environnement</li> <li>• Maintien des fonctions critiques, retour d'expérience et amélioration de la restructuration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de l'apprentissage</li> <li>• Adaptation au changement et augmentation de la capacité adaptative du système</li> <li>• Inclusion de l'évolution (valeurs sociales, incertitudes, réglementaire et législatif) du système</li> </ul>	

*Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)*

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Identification de typologie de résilience (définition de la résilience)	Politique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Détermination des horizons temporels de la résilience</li> <li>• Gestion des actifs (compromis entre création de valeurs, acceptation du risque, détermination des perturbations à intégrer, valeurs à protéger et acceptabilité des coûts)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Governance axée sur la résilience</li> <li>• Intégration systématique des activités de résilience</li> </ul>	

Tableau 4.1 - Approches génériques de la gestion de la résilience (suite)

Concepts	Facteurs influences des concepts	Approches génériques	Approches spécifiques en contexte des réseaux électriques	Sources
Modélisation et simulation des systèmes complexes et des perturbations	Modélisation du système Modélisations des perturbations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caractérisation du comportement du système en cas de perturbations</li> <li>Caractérisation du risque de panne suite aux perturbations (approche bayésienne)</li> <li>Inclusion des perturbations (interne ou externe, prévisibles ou imprévisibles) du système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation de PowDDER (<i>Power Distribution Design for Relisence</i>)</li> <li>Analyse des courbes de fragilité des lignes électriques et des tours dans les conditions extrêmes des perturbations</li> <li>Utilisation de SAPHIRE (<i>Systems Analysis for Hands-on Reliability Evaluations</i>)</li> <li>Intégration de la dynamique du système (technique, économique, sociale et environnementale)</li> </ul>	(Cerè et al., 2017; Jain, Pasman, et al., 2018; Mazur et al., 2019; M. Panteli et al., 2017; Yuan et al., 2018)



*Figure 4.7. Cadre générique de gestion de la résilience*

À partir de ces informations tirées de la littérature et présentées dans le Tableau 4.1, un cadre générique est proposé à la figure 4.7. Dans ce cadre générique de gestion de la résilience, la gestion des actifs est au cœur des activités. Elle coordonne et agit comme un lien de communication entre les différentes étapes du cadre. La gestion des actifs soutient la gestion de la résilience dans le choix des actifs à protéger en priorité, des événements à inclure dans l'analyse de la résilience et ce, par le biais de l'équilibre des coûts, des risques et des opportunités.

En effet, dans le contexte des systèmes complexes, la question soulevée par Aven (2017) est importante, à savoir quels événements inclure dans les jugements de résilience ? L'auteur répond qu'il n'est pas nécessaire d'identifier tous les événements futurs pour reconnaître l'utilité de la résilience dans de nombreuses situations. En ce sens, il n'est pas

indispensable de connaître toutes les causes de scénario de naufrage d'un navire pour disposer de moyens de protection et de sauvetages (J. Park et al., 2013). Conséquemment, les évènements à inclure dans le jugement de la résilience, les fonctions critiques du système à protéger et la fixation de leurs seuils de performances, s'alignent avec l'objectif de la gestion des actifs à savoir l'équilibre entre les risques, les coûts et les opportunités attendues sur les actifs d'une organisation.

Après la discussion sur le rôle de la gestion des actifs dans la gestion de la résilience, les étapes de ce cadre proposé sont définies comme suit :

- identification du besoin d'avoir un système résilient : pour mettre en place les stratégies de la résilience, il y a lieu d'identifier le besoin d'avoir un système résilient qui dépend de la définition du système, de ses interdépendances, de la prévisibilité et de l'impact de ses perturbations (vulnérabilité du système), de la pertinence de la gestion du risque face aux incertitudes et de la nécessité du maintien de ses fonctions critiques (Carpenter et al., 2001; Eisenberg et al., 2014; Linkov et al., 2014). Définir un système c'est déterminer ses domaines, ses objectifs et sa caractérisation (Francis et Bekera, 2014). Il se doit de prendre en compte, toutes les composantes socio-technico-économiques du système ainsi que ses interdépendances (Linkov et al., 2014).

Au sens large, la résilience peut être décrite comme un processus général de réaction aux changements par rapport à la relation entre un système et son environnement (Gallopin, 2006). C'est ce qui fait que l'identification des composants et de leur interdépendance constituent une étape importante (Mazur et al., 2019). La possibilité de surprise et les lacunes de la gestion du risque au sein des systèmes complexes ont été largement démontrés dans la littérature et ont conduit à l'appel pour le développement de la résilience comme indiqué dans la problématique de cette étude. La nécessité du maintien des fonctions critiques des systèmes complexes qui sont pour la plupart du temps vital au fonctionnement de la société moderne, constitue l'essence même du recours à la résilience pour ces systèmes (Zio, 2016);

- définition des objectifs et des contraintes de la résilience : pour définir l'objectif de la résilience, le type d'évènement y compris ceux qui sont imprévisibles, est à considérer ainsi que les fonctions du système à maintenir. Il vise à répondre à la question : dans les circonstances de telles perturbations (même inconnues), quelles sont les fonctions et performances qui doivent être maintenues ou rétablies le plus rapidement possible ? Pour ce faire, la définition des fonctionnalités critiques à maintenir et des contraintes en cas de perturbations est nécessaire (Eisenberg et al., 2014). Par exemple, à partir des courbes de fragilité basées sur la vitesse de vent et du poids des branches d'arbre en cas d'évènements météorologiques extrêmes, les éléments à priorisés pendant le durcissement des pôles critiques (poteaux-câbles) d'un système de distribution de réseau électrique a pu être obtenue eu égard aux indices de fiabilité du système (Yuan et al., 2018).

L'amélioration de la récupération rapide des fonctionnalités d'un système après les perturbations s'accompagne avec la détermination de seuils de performances. Par exemple, la valeur de continuité des opérations « *Business Continuité Value* » est la fonction de la perte attendue (directe et indirect) suite à une perturbation et de la perte maximale tolérable pour une organisation (Zeng et Zio, 2017). Dès lors, une fixation de seuils de performances fait partie intégrante des objectifs de la résilience. La détermination de ces seuils permet de mesurer la capacité du système à absorber les perturbations et à identifier les points de basculement des effets en cascades (Bostick et al., 2018);

- modélisation du système et de ses perturbations : les accidents dans les systèmes complexes sont souvent causés par l'incompréhension de leurs interactions (Jain, Pasman, et al., 2018). Zio (2016) soutient que la protection des systèmes complexes passe par la modélisation de leurs composants critiques en phase de perturbations puis par la quantification de leur niveau de risque et de vulnérabilité. L'intégration des incertitudes et un approfondissement de connaissances sur les systèmes complexes deviennent nécessaires. Ceci peut être soutenu par la modélisation du système et ses perturbations. Plusieurs auteurs soulignent l'importance de la modélisation/simulation du système et de ses perturbations en tant qu'assise de la résilience (Hussain et al.,

2019; Jain, Pasman, et al., 2018; Linkov et al., 2014; Patriarca, Bergström, et al., 2018). Par conséquent, la modélisation et la simulation aident à analyser les performances d'un système sous différents scénarios et permet de tester ses réponses possibles participant ainsi à l'amélioration de la résilience (Mazur et al., 2019);

- choix de la typologie de la résilience : la résilience couvre plusieurs domaines tels que l'écologie, la psychologie, l'économie, l'ingénierie, etc. (Hosseini et al., 2016). La résilience en ingénierie peut être obtenue par la combinaison des approches de résilience dans les domaines à savoir : technique, organisationnelle, sociale, écologique, politique et économique (Bostick et al., 2018; J. Park et al., 2013; Sikula et al., 2015). C'est l'interconnectivité qui augmente la vulnérabilité des systèmes complexes. Plusieurs études se sont penchées sur le développement/compréhensions des interconnectivités. Par exemple, Komljenovic et al. (2016) ont élaboré un modèle de prise de décision en gestion des actifs en contexte des évènements rares par le biais de l'identification des éléments pertinents qui ont trait aux aspects technique, organisationnel, économique, social et politique, à leurs sous-modèles (sous-composants) ainsi qu'à leurs interconnections. Jain, Pasman, et al. (2018) ont élaboré un cadre de gestion de la résilience dans les systèmes basés sur les interactions des différents composants et sous-composants dans les systèmes complexes. Zio et Aven (2011) ont développé une approche de l'analyse des incertitudes dans le contexte des systèmes électriques intelligents qui intègrent les interactions entre les défis technologiques, opérationnels, économiques, sociaux et politiques;
- évaluation dynamique et amélioration de la résilience : elle constitue un processus dynamique qui repose sur les éléments à savoir la préparation/anticipation, l'absorption/l'atténuation, la récupération et l'adaptation/l'apprentissage (Bostick et al., 2018; Cerè et al., 2017; Hosseini et al., 2016; Hussain et al., 2019; Jain, Pasman, et al., 2018; Jufri et al., 2019; Linkov et al., 2014; J. Park et al., 2013; Patriarca, Bergström, et al., 2018; Shen et al., 2018; Sikula et al., 2015; Yuan et al., 2018).

La classification des approches de résilience selon les horizons temporels est présentée dans les tableaux 4.2 et 4.3 respectivement pour les courts et long termes.

**Tableau 4.2 - Approches de résilience à court terme**

	Approches de résilience	Source
Approches de résilience	<p>Avant perturbations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluation de la gravité et de la zone d'impact des perturbations</li> <li>• Suivi et maintenance des équipements y compris les éléments de secours</li> <li>• Actions préventives traditionnelles (gestion de la demande, contrôle des informations. etc. )</li> <li>• Estimation, formation et prépositionnement du nombre d'équipes d'intervention en cas d'événements extrêmes</li> <li>• Planification de la réserve</li> <li>• Implication, engagement et information des parties prenantes</li> <li>• Collaboration des personnes physiques ou morales qui ont un intérêt pour la résilience</li> <li>• Établissement des politiques de gouvernance et responsabilités en matière de résilience de la part de la direction</li> </ul> <p>Pendant perturbations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle des procédures administratives</li> <li>• Surveillance</li> <li>• Coordination entre les équipes impliquées et assurance de la fonctionnalité du moyen de communication</li> <li>• Actions correctives traditionnelles (activation des moyens de protection et de contrôle, reconfiguration, redémarrage, etc.)</li> </ul> <p>Après perturbations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluation des dégâts et définition des priorités</li> <li>• Restauration, reconfiguration et resynchronisation des équipements (poteaux, tours, lignes de transmission, charge, etc.)</li> </ul>	(Mathaios Panteli et Mancarella, 2015; Zamuda, Wall, et al., 2019)

**Tableau 4.3 - Approches de résilience à long terme**

	<b>Approches de résilience</b>	<b>Source</b>
Approches de résilience en contexte des réseaux électriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorporation de la gestion du risque traditionnelle et sous incertitude</li> <li>• Actualisations des plans d'urgence au vu de l'évolution des incertitudes</li> <li>• Développement des interconnectivités : centralisation et/ou décentralisation du réseau, facilitation de l'accès aux éléments vulnérables en cas de perturbations, gestion de la végétation pour libérer les lignes de transports, etc.</li> <li>• Modernisation des éléments structurels avec des matériaux plus robustes et adaptés aux perturbations</li> <li>• Prioriser les lignes de transport et de distribution souterraines;</li> <li>• Surélevations des sous-stations</li> <li>• Relocalisations des installations vers des zones moins exposées aux inondations et intempéries</li> <li>• Veille technologique et scientifique (stockage d'énergie, production distribuée, gestion de la demande, micro-réseaux, systèmes de contrôle et de protection avancée, système de visualisation et d'information avancé, etc.</li> </ul>	(Mathaios Panteli et Mancarella, 2015; Zamuda, Wall, et al., 2019)

#### 4.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de développer un modèle de prise de décision sous risque, incertitude et résilience. Il a également permis L'élaboration d'un cadre de gestion de la résilience. Ce faisant, il sera question dans le chapitre suivant d'aborder la mise en application de ces modèles développés.

## **CHAPITRE 5 - ÉTUDE DE CAS ET MISE EN APPLICATION DU CADRE DE PRISE DE DECISION**

### **5.1. Introduction**

Ce chapitre vise à mettre en application du cadre développé par le biais de l'étude d'un cas tiré d'Hydro-Québec distribution. En premier lieu, il sera question de quantifier la résilience du service de distribution d'Hydro-Québec sur la base des données historiques des interruptions de service lors de la tempête du 1<sup>er</sup> novembre 2019, un élément clef dans le cadre de la gestion de la résilience. En second lieu, et en lien avec la prise de décision considérant ce type d'évènement rare en gestion des actifs, une évaluation des coûts-avantages d'avoir des lignes aériennes versus des lignes souterraines sera proposée. La modélisation des coûts des évènements météorologiques extrêmes et l'évaluation des caractéristiques techniques de chacune de ces deux stratégies sera présentée.

### **5.2. Présentation de l'entreprise Hydro-Québec**

Hydro-Québec a comme unique actionnaire, le gouvernement du Québec (Hydro-Québec, 2017). Elle est l'une des plus grandes entreprises nord-américaines de production, de transport et de distribution d'électricité. Sa principale source de production est basée sur l'utilisation de l'eau par l'entremise de centrales hydroélectriques et œuvre en permanence pour soutenir le développement des technologies liées aux énergies propres (Hydro-Québec, 2020).

Quelques éléments concernant l'entreprise sont présentés comme suit (Hydro-Québec, 2017, 2018) :

- 4.3 millions de clients;
- 77 G\$ CA d'actifs dont 63 centrales hydroélectriques, 24 centrales thermiques, 34 361 kilomètres sont attribués au réseau de transport et 1 181 130 kilomètres au réseau de distribution en moyenne tension, 148 M\$ CA en budget de R-D;
- la capacité de production est de 37 310 MW;

- plus de 99 % de sa production d'électricité provient exclusivement de sources d'énergie renouvelables.

### **5.3. Description de l'évènement de la tempête automnale du 1<sup>er</sup> novembre 2019**

Environnement-Canada (2019) et JournaldeMontréal (2019) décrivent cette tempête automnale comme suit :

« L'évènement du 1<sup>er</sup> novembre 2019 » est la plus grande interruption de service d'électricité depuis la crise du verglas de 1998. Des rafales de vent allant jusqu'à 104 km ont été enregistrées dans certains lieux. C'est ce qui a constitué la source des pannes d'électricité pour près de deux millions de québécois. Ces pannes étaient particulièrement répandues à Montréal, en Montérégie, dans les Laurentides, en Estrie, dans Lanaudière et dans la région de la Beauce et de la ville de Québec. Combinée à des pluies, cette tempête a également provoqué des inondations au centre-ville de plusieurs collectivités. À Sherbrooke par exemple, plus de 100 mm de pluie ont fait monter la rivière Saint-François sur plus de sept mètres. Cela a eu comme conséquence, l'évacuation de 250 bâtiments. Les pertes de biens se sont chiffrées à hauteur de plusieurs millions de dollars. Les autorités ont confirmé quatre décès au Québec.

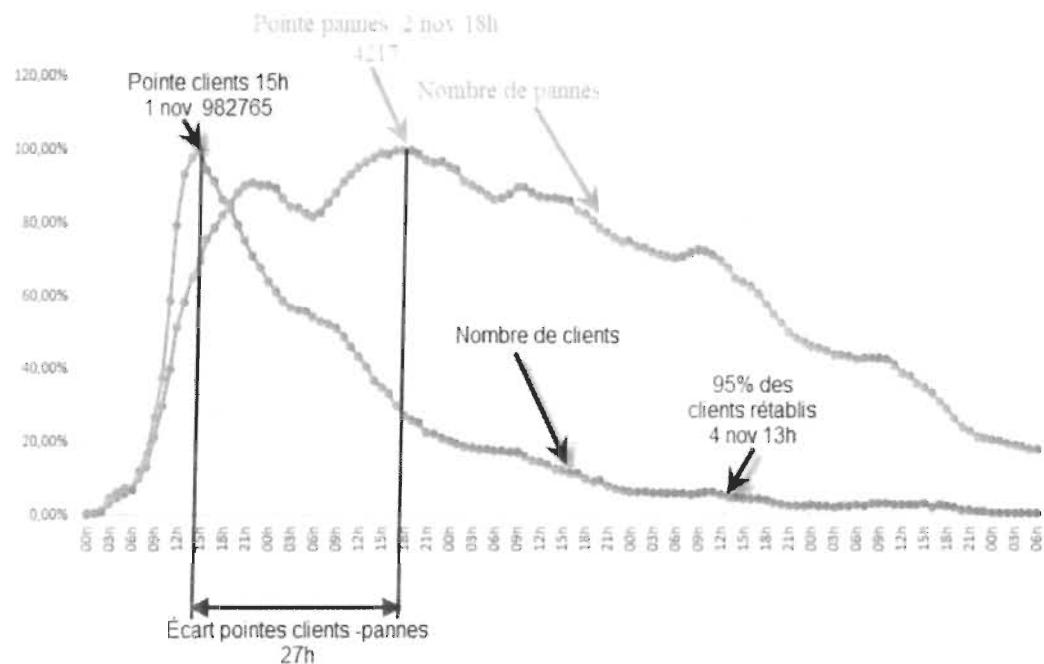
Toutefois, grâce aux 1500 travailleurs sur le terrain, le service d'électricité a pu rétablir la quasi-totalité des clients touchés. Au plus fort de l'évènement, il y a eu environ 990 000 clients privés d'électricité. Les vents très violents ont été la cause de la plupart des nombreuses pannes. Le coût de la tempête a été évalué à près de 30 M\$ pour Hydro-Québec.

Cette étude de cas a pour but de mettre en application le modèle de prise de décision et le cadre de gestion de la résilience (partie modélisation) développé dans le contexte du réseau des lignes électriques de distribution d'Hydro-Québec. Elle cherche à modéliser le comportement de la résilience du réseau lors de la tempête automnale du 1<sup>er</sup> novembre 2019 puis de contextualiser le cadre développé dans les circonstances des lignes électriques de distribution face aux perturbations météorologiques extrêmes.

#### 5.4. Données historiques d'interruptions de services d'Hydro-Québec lors de la tempête automnale du 1<sup>er</sup> novembre 2019

La figure 5.1 présente l'évolution de l'interruption des services et des pannes lors de cet événement. La légende en bleu illustre le nombre de clients privés d'électricité et en orange celui du nombre de pannes. Les pourcentages sont évalués par rapport aux pointes.

Le tableau 5.1 récapitule les données des interruptions des pannes en fonction du temps et de leur pourcentage de récupération. Par exemple, le pourcentage de clients affectés à 3h (heure locale) du matin en date du 01/11/2019 est obtenu comme suit : (nombre de clients affectés/nombre de clients au total) \*100 =  $\frac{49*10^3}{4.3*10^6} * 100 \cong 1.14\%$  .



**Figure 5.1. Évolution du service et des pannes lors de la tempête (données interne Hydro-Québec distribution)**

La figure 5.1 montre qu'il existe un décalage entre la pointe de l'interruption du service et celui du nombre des pannes. Cela montre qu'il n'y a pas de liaison de linéarité entre le nombre d'interruption et le nombre de pannes. Par exemple, une interruption peut engendrer d'autres, dépendamment du type de liaison et de leur influence sur l'interruption du service, qui dépend du nombre de client sur la ligne, du type de connexion, etc.

**Tableau 5.1 - Données historiques des interruptions de service et de leur pourcentage de récupération**

Date	heure locale (heure)	heure cumulée (h) (x sur la courbe de modélisation)	Nombre de clients affectés par milliers	% de clients affectés	% de fonction récupération (y sur la courbe de modélisation)
01/11/2019	0	0	0,00	0,00	100,00
	3	3	49,00	1,14	98,86
	6	6	118,00	2,74	97,26
	9	9	353,00	8,21	91,79
	12	12	786,00	18,28	81,72
	15 (pointe)	15	983,00	22,86	77,14
	18	18	825,00	19,19	80,81
	21	21	727,00	16,91	83,09
02/11/2019	0	24	609,00	14,16	85,84
	3	27	550,00	12,79	87,21
	6	30	530,00	12,33	87,67
	9	33	491,00	11,42	88,58
	12	36	413,00	9,60	90,40
	15	39	354,00	8,23	91,77
	18	42	236,00	5,49	94,51
	21	45	216,00	5,02	94,98
03/11/2019	0	48	196,00	4,56	95,44
	3	51	187,00	4,35	95,65
	6	54	177,00	4,12	95,88
	9	57	167,00	3,88	96,12
	12	60	137,00	3,19	96,81
	15	63	157,00	3,65	96,35
	18	66	118,00	2,74	97,26
	21	69	79,00	1,84	98,16
04/11/2019	0	72	69,00	1,60	98,40
	3	75	59,00	1,37	98,63
	6	78	54,00	1,26	98,74
	9	81	49,00	1,14	98,86
	12	84	44,00	1,02	98,98
	15	87	39,00	0,91	99,09
	18	90	34,00	0,79	99,21
	21	93	29,00	0,67	99,33

La modélisation du pourcentage de récupération de cet évènement peut s'écrire sous la forme suivante (Cassottana et al., 2019) :  $MOP(t) = TP_0 - at^b e^{-ct}$  avec  $a, b, c \geq 0$  ou a, b et c sont à déterminer, t représente l'échelle du temps et

$TP_0 = \text{pourcentage de récupération juste avant la tempête} = 100$

### 5.5. Algorithme de programmation sur Matlab

Connaissant la forme générale de l'équation du pourcentage de récupération de la tempête, la combinaison des données historiques du déroulement de la tempête et des fonctions « fitting » sur Matlab, permettent de déterminer ces paramètres. Ces fonctions « fitting » permettent d'approximer les paramètres d'une forme de fonction donnée à partir des valeurs d'entrée et de sorties. En prenant  $TP_0 = 100$ , la programmation sur Matlab pour la détermination des paramètres de l'équation du pourcentage de récupération de la tempête est illustrée comme suit :

```
function [fitresult, gof] = createFit(x, y)
    % Fit: 'modélisationtempête'.
    x=0:3:93; % heure cumulée avec
    % comme repère t= 0 au moment où l'heure local est à 00h
    % (heure local) du matin en date du 01 novembre 2019. Le cumul des
    % heure est sous la forme de 0 à 93 par pas de 3h
    y=[100; 98.86; 97.26; 91.79; 81.79; 77.14; 80.81; 83.09; 85.84; 87.21;
    87.67; 88.58; 90.40; 91.77; 94.51; 94.98; 95.44; 95.65; 95.88; 96.12;
    96.81; 96.35; 97.26; 98.16; 98.40; 98.63; 98.74; 98.86; 98.98; 99.09;
    99.21; 99.33];
    % pourcentage de la performance du système d'actifs du réseau de
    % distribution de HQ pour chaque valeur prise par la variable du
    % temps x

    [xData, yData] = prepareCurveData( x, y );

    % Set up fittype and options.
    ft = fittype( '100-a*x^b*exp(-c*x)', 'independent', 'x', 'dependent',
    'y' );
    opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
    opts.Display = 'Off';

    % Fit model to data.
    [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

    % Plot fit with data.
    figure( 'Name', 'modélisationtempête' );
    h = plot( fitresult, xData, yData );
```

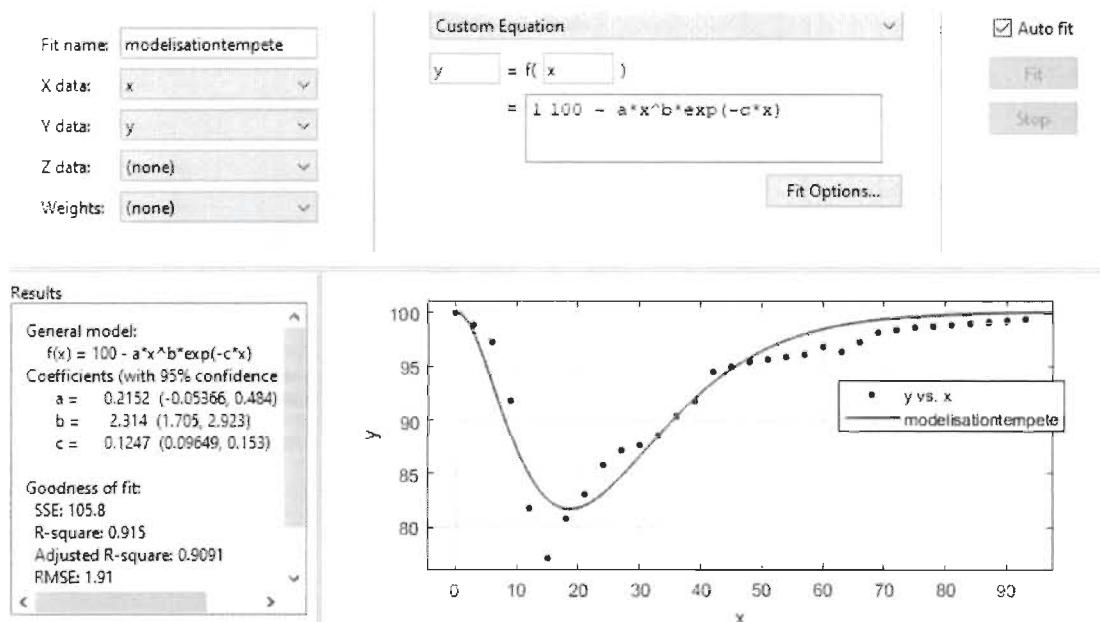
```

legend( h, 'courbe réelle', 'courbe modélisée', 'Location',
'NorthEast' );
Label axes
 xlabel x
 ylabel y
 grid on

```

## 5.6. Modélisation du processus de récupération de la tempête

La figure 5.2 suivante illustre la courbe de simulation du processus de récupération.



*Figure 5.2. Modélisation de la courbe de récupération de la tempête*

La simulation sur Matlab avec  $TP_0 = 100$  (% performance du réseau avant la tempête) a donné :  $R^2$  (coefficient de corrélation) = 0.915

L'algorithme montre que lors de la tempête automnale, le pourcentage du processus de récupération du système d'actifs du réseau de distribution d'Hydro-Québec face à la tempête automnale du 1<sup>er</sup> novembre 2019 en fonction du temps, est modélisé comme suit :

$$MOP(t) = 100 - 0,2152t^{2.314}e^{-0.1247t} \text{ (en %)}$$

D'après Cassottana et al. (2019), les paramètres de cette fonction de récupération sont interprétés comme suit :

$a = 0,2152$  = représente le paramètre de location. Il mesure la vulnérabilité du système et dépend de la robustesse du réseau de distribution d'HQ et de la gravité de la tempête. Pour un système parfaitement robuste  $a=0$ ;

$b = 2.314$  = représente le paramètre de forme. Il illustre le taux d'adaptation et de restauration par unité du temps lors du processus de récupération du système d'actifs du réseau de distribution d'HQ et dépend de la perte de performance et du temps de récupération. Pour un système avec une adaptation et une restauration parfaite  $b=0$ ;

$c = 0.1247$  = représente le paramètre d'échelle. Il illustre le taux d'absorption par unité de temps du système durant toute la période de récupération. Pour un système avec une capacité absorptive parfaite  $c=0$ .

$t$  = durée en heures cumulées depuis le premier choc de la tempête.

Les valeurs de ces paramètres peuvent être combinées avec les simulations du comportement du réseau d'Hydro-Québec pour contribuer à prioriser la robustesse du réseau et/ou améliorer le processus/préparation organisationnel, technique, social et économique lié aux périodes de reprises pour ce type d'évènements. La section suivante sert de modèle de l'évaluation des couts des évènements extrêmes dans le service de distribution d'Hydro-Québec.

## **5.7. Modélisation des coûts des évènements majeurs en contexte des lignes aériennes de distribution d'Hydro-Québec**

### **5.7.1. Données historiques des évènements majeurs dans le service de distribution**

L'évènement de la tempête automnale peut être classé parmi les pannes majeures du service de distribution d'Hydro-Québec. Les coûts des pannes majeures de 2009 à 2019, leurs clients heures-interruptions (CHI), leurs jours évènement extrême et les coûts de la gestion de la végétation chez Hydro Québec distribution, sont présentés dans l'annexe A (confidentiel). La gestion de la végétation consiste à créer une distance minimale entre les arbres (y compris leurs branches) et les lignes de distribution. Cette distance peut servir à protéger ces lignes contre les dommages de la chute des arbres et des branches lors des

vents forts. Les coûts associés à ces activités constituent les coûts de la gestion de la végétation.

#### 5.6.2. Estimation de la fonction de répartition des coûts annuels des évènements rares (pannes majeures) du service de distribution

Pour la période de 2009 à 2019, les conditions suivantes sont vérifiées dans le contexte des pannes du service de distribution électrique aérien d'Hydro-Québec :

- les pannes majeures sont continues ( il y a eu des coûts associés aux pannes de manière continue à chaque année durant la période 2009 à 2019) ;
- elles sont uniformément distribuées (répartition annuelle);
- les coûts représentent les maximums enregistrés lors des pannes du service de distribution;
- les causes de ces pannes sont supposées être indépendantes car elles sont liées aux évènements météorologiques.

Ainsi, ces coûts d'investissement annuel dans les pannes majeures obéissent aux distributions de valeurs extrêmes « *Generalized extreme value (GEV) distributions* » qui servent à formuler les évènements probabilistes rares (H. Chen et Zhao, 2020).

Soit  $x_i$ = Variable aléatoire qui représente l'investissement total du service de distribution dans les pannes majeures pour l'année  $i$ ; avec  $i = 2009$  à  $2019$ . La forme généralisée de la fonction de répartition de distribution de ce type de variable aléatoire est la suivante (Bell, 2006; H. Chen et Zhao, 2020; Zheng et Sayed, 2019) :

$$F(x_i; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \text{ avec } 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} > 0 ;$$

$$\sigma > 0; x_i, \mu \text{ et } \xi \text{ définis sur } \mathbb{R}$$

où  $\mu, \sigma, \xi$  représentent respectivement les paramètres de localisation « *location* », d'échelle « *scale* » et de forme « *shape* ».

Plus le nombre de paramètres est élevé, plus le niveau d'incertitude augmente. De ce fait, en réduisant le nombre de paramètres, les incertitudes pourraient elles aussi diminuer.

L'analyse des valeurs du paramètre de forme de la distribution  $F(x_i; \mu, \sigma, \xi)$  se résume comme suit (Mathwave, 2020):  $\xi < 0$  ( distribution de Weibull),  $\xi = 0$  (distribution de Gumbel) et  $\xi > 0$  (distribution de Fréchet). L'analyse du contexte d'utilisation de chacune de ces distributions permet de poser l'hypothèse suivante  $\xi = 0$

il vient :

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} F(x_i; \mu, \sigma, \xi) = \lim_{\xi \rightarrow 0} \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\}$$

$$\text{Or } \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} = \exp \left\{ \ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \text{ puisque } 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} > 0$$

$$= \exp \left\{ - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)}{\xi} \right\}$$

$$\text{Ainsi, } \lim_{\xi \rightarrow 0} \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\} = \lim_{\xi \rightarrow 0} \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)}{\xi} \right] \right\}$$

$$\text{Or } \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)}{\xi} = \frac{0}{0} \text{ forme indéterminée}$$

On sait que  $\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right) = \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma}$  (approximation du comportement de la fonction  $\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)$  autour de  $\xi = 0$  : développement limité à l'ordre 1)

$$\text{Il vient : } \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)}{\xi} = \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma}}{\xi} = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

$$\text{On en déduit : } \lim_{\xi \rightarrow 0} F(x_i; \mu, \sigma, \xi) = \lim_{\xi \rightarrow 0} \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\}$$

$$= \lim_{\xi \rightarrow 0} \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} \right)}{\xi} \right] \right\} = \lim_{\xi \rightarrow 0} \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right] \right\} = \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right] \right\}$$

$$\text{Ainsi: } F(x_i; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right] \right\} \text{ lorsque } \xi = 0$$

On retrouve la fonction de répartition de la distribution de Gumbel (Gómez et al., 2019).

Cette distribution de Gumbel a été largement utilisée dans la littérature pour caractériser plusieurs phénomènes rares et extrêmes (Gómez et al., 2019; Miladinovic et Tsokos, 2009). Par exemple, Bell (2006) l'a appliquée pour vérifier le rendement d'option des prix de tarification des actifs financiers de l'Union Européen (U.E) face aux évènements extrêmes touchant les marchés financiers. S. Park et al. (2016) l'ont utilisée pour estimer la distribution des valeurs extrêmes de la vitesse du vent dans trois sites ayant des conditions météorologiques différentes. Yue (2000) l'a utilisée pour déterminer la distribution marginale des pics et des quantités de tempêtes ainsi que leurs périodes de retour. Komljenovic et al. (2016) s'en sont servis pour déterminer les risques d'interruptions extrêmes du service d'Hydro-Québec en se basant sur les CHI (clients heure interruption) max enregistrés par année. Or, dans le cas de cette étude, les coûts liés aux pannes majeurs sont fortement corrélés ( $R^2 = 0.9408$  d'après l'annexe A) avec les CHI (Clients heures/interruptions). Ainsi, la distribution de Gumbel sera utilisée pour modéliser la distribution des coûts des pannes majeures du service de distribution électrique aérien d'Hydro-Québec.

Pour trouver les paramètres de cette distribution, plusieurs méthodes existent parmi lesquelles se trouve la méthode graphique qui s'effectue comme suit (CUAHSI, 2020; NIST, 2020) :

- classer les  $x_i$  par ordre croissant;
- attribuer un rang  $i$  ( $r_i$ ) à chaque valeur de  $x_i$
- calculer les fréquences empiriques  $F(x_i) = (r_i - 0.44)/(n + 0.12)$   
(estimation de Gringorten)

avec  $n$  = nombre d'années d'observation = 11 pour notre cas.

- poser  $z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$ , il vient  $-\ln(F(x_i)) = \exp(-z_i) \Rightarrow z_i = -\ln(-\ln(F(x_i)))$

Avec  $F(x_i; \mu, \sigma, \xi) = F(x_i)$  et  $x_i = z_i \sigma + \mu$

-tracer graphiquement ( $z_i$ (en abscisse),  $x_i$  classé par ordre croissant (en ordonnée) et déterminer  $a = \sigma$  et  $b = \mu$  ainsi que le coefficient de corrélation

L'annexe B (confidentiel) présente les données de détermination des paramètres Gumbel & Graphique Gumbel pour les investissements annuels dans les pannes majeures en aérien.

On déduit de l'annexe B (confidentiel) que ces paramètres sont :

$\sigma = 13.87$ ;  $\mu = 16.021$  et le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) = 0,965.

Ainsi, la distribution des investissements dans les pannes majeures en aérien peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F(x_i; \mu, \sigma) = \exp \left\{ -\exp \left[ -\frac{x_i - 16.021}{13.87} \right] \right\} = F(x_i)$$

### 5.7.3. Test d'ajustement

#### 5.7.3.1. Test de Kolmogorov-Smirnov (test KS)

Ce test est vérifié lorsque :

$$D_\alpha > D$$

Avec  $D = \max \left[ D1 = \max \left| \frac{i}{n} - F(x_i) \right| ; D2 = \max \left| F(x_i) - \frac{i-1}{n} \right| \right]$  et  $D_\alpha$  est prédéfinie dans des tables. Les données du test de Kolmogorov-Smirnov sont illustrées dans l'annexe C.

$$\text{On a } D1 = \max \left| \frac{i}{n} - F(x_i) \right| = 0,1552; D2 = \max \left| F(x_i) - \frac{i-1}{n} \right| = 0,1219$$

Pour  $n=11$  et  $\alpha = 0.05$ ,  $D_\alpha = 0,3910 > D = \max (D1, D2) = 0,1552$

Ainsi, le test de Kolmogorov-Smirnov est vérifié : la distribution de Gumbel peut représenter les coûts investis en pannes majeures dans les lignes aériennes d'Hydro-Québec distribution.

### 5.6.3.2. Test d'Anderson-Darling (test AD)

Il est vérifié lorsque :

$$A_{\alpha}^2 > A^2 \text{ où } A_{\alpha}^2 \text{ est prédéfinie dans des tables et } A^2 = -n - S$$

$$\text{avec } S = \sum_i^n S_i \text{ Avec } S_i = \frac{1}{n} (2i - 1) [\ln (F(i)) + \ln (1 - F(n + 1 - i))]$$

Par souci de notation,  $F(i) = F(x_i) = F(xi) = \text{distribution uniforme}$ . Les données du test d'anderson-Darling sont présentées à l'annexe C.

Pour  $\alpha = 0.05 \Rightarrow A_{\alpha} = 0,757 > A^2 = 0,2753$

Le test d'Anderson et Darling est vérifié : la distribution de Gumbel peut représenter les coûts investis en pannes majeures dans les lignes aériennes d'Hydro-Québec distribution.

### 5.6.4. Calcul de la période de retour (périodicité) des pannes majeures

On sait que la fréquence d'un évènement est inversement proportionnelle à sa période. Or, la fréquence à laquelle une variable aléatoire  $X$  pourra engendrer un coût économique de même ampleur que  $xi$  (coût économique d'une panne majeure à l'année  $i$ ) est :  $P(X \geq xi) = 1 - P(X < xi) = 1 - F(xi)$

Il résulte que la période de retour s'écrit comme suit :  $T = \frac{1}{1-P} = \frac{1}{1-F(xi)}$

T représente la durée de temps au bout duquel ces événements sont susceptibles de revenir. L'annexe D (confidentiel) présente la période de retour des investissements dans les pannes majeures en aérien.

Les coûts associés aux évènements extrêmes sont principalement dus aux phénomènes météorologiques et affectent essentiellement les lignes aériennes. Dans la section suivante, il sera question dans d'évaluer les coûts et caractéristiques intrinsèques à chaque la stratégie d'avoir les lignes aériennes ou souterraines.

## **5.8. Coûts des pannes dans les lignes souterraines d'Hydro-Québec distribution**

L'annexe E (confidentiel) présente les ratios coûts, taux d'interruption, durée de vie et coût de remplacement des principaux éléments entre les structures aérienne et souterraine ainsi que les coûts de la gestion de la végétation. Cette annexe permet de connaître les caractéristiques techniques et les coûts associés aux structures principales entre les lignes aériennes et souterraines.

## **5.9. Mise en application du cadre développé dans le contexte de l'étude de cas**

La présente section présente une mise en application du cadre de prise de décision sous risque, incertitude et résilience développé dans le chapitre 4 en contexte d'Hydro-Québec distribution. Chaque étape du cadre est mise en pratique par l'utilisation des données d'Hydro-Québec distribution et/ou de la littérature scientifique dans le domaine des réseaux de distribution électrique.

### **5.9.1 Base des évidences**

Elle constitue la première étape du cadre et est présentée par la figure 4.1. Elle est obtenue sur la base des données historiques du service de distribution d'Hydro-Québec distribution. Elle réunit l'ensemble des informations sur les phénomènes météorologiques qui occasionnent les pannes majeures, les coûts et les caractéristiques techniques des lignes aériennes et souterraines, les données sur les mesures de performances, les taux d'interruptions, etc. sur le service de distribution d'Hydro-Québec (HQ). Une fois, cette base des évidences est obtenue, il sera question dans la section suivante de fonder la base des connaissances.

### **5.9.2. Base de connaissances**

La base de connaissances s'appuie sur les connaissances scientifiques généraux sur les systèmes électriques et les événements météorologiques extrêmes. Elle est présentée à la figure 4.2. En ce qui a trait aux systèmes électriques, la base des connaissances s'appuie sur :

- ils appartiennent aux systèmes complexes critiques et hautement vulnérables de la société civile moderne (Zio, 2016; Zio et Aven, 2011);
- au sein de ces systèmes complexes, les perturbations peuvent être en grande partie inconnues (Aldunce et al., 2015; Aven, 2017, 2018; J. Park et al., 2013);
- pour ces systèmes, un effet aussi négligeable qu'il soit peut avoir des effets désastreux sur les actifs d'une organisation du fait de leur manque de linéarité et de leur forte interdépendance (Helbing, 2013; Nicola Paltrinieri et Reniers, 2017; Quigley et Revie, 2011; Straub et al., 2016; M. Yang et al., 2015);
- les défaillances peuvent sembler résulter pour des raisons extraordinaires (J. Park et al., 2013);
- le manque de données antérieures pour certaines perturbations et l'acceptation du risque résiduel sans pour autant définir avec exactitudes leurs conséquences, remettent également en cause la possibilité d'identification des perturbations (Bostick et al., 2018);
- il existe en leur sein, une forte interconnexion technico-socio-économique (Mazur et al., 2019);
- il y a une intégration accrue du réseau électrique avec d'autres infrastructures critiques (Zio et Aven, 2011);
- équilibre la production et la demande mais la capacité d'équilibrer la production avec l'appel de la charge (demande + perte de charges) doit être maintenue à tout moment quelles que soit les fluctuations de la demande et de l'état de dégradation des actifs sous l'influence de la vieillesse ou des perturbations internes ou externes.

En ce qui a trait aux évènements météorologiques extrêmes :

- la prévisibilité des phénomènes météorologiques extrêmes reste difficile (Jufri et al., 2019);

- un faible effet des causes peut avoir de grandes conséquences (impacts) (Hussain et al., 2019);
- leurs perturbations sont de plus en plus dommageables en raison des interdépendances (Shen et al., 2018);
- les perturbations peuvent être de nature émergente ou inconnue (Zio, 2016);
- il n'existe pas de méthodes scientifiques valables pour prédire avec précision à long terme, la distribution spatiale des changements climatiques (Linkov et al., 2014);
- il n'existe pas de méthodes scientifiques précises pour quantifier leur impact sur les systèmes critiques de la société civile (Linkov et al., 2014);
- les conditions météorologiques extrêmes sont considérées comme l'une des principales causes de perturbations majeures pour les systèmes électriques dans le monde (Mathaios Panteli et Mancarella, 2015);
- les changements climatiques devraient augmenter en fréquence, durée et intensité des événements météorologiques extrêmes (Panteli et Mancarella, 2015);
- ils devraient augmenter en ampleur et en coût (Zamuda, Larsen, et al., 2019);
- les principaux événements météorologiques qui occasionnent le plus de pannes du service de distribution d'Hydro-Québec sont : cyclones post-tropicaux en été, dépression en hiver, dépression nord-ouest de l'Atlantique, le *clipper* de l'Alberta, dépressions du Colorado, dépression du Texas.
- l'interconnectivité augmente la vulnérabilité des événements météorologiques : interdépendance/interconnectivité entre les éléments techniques (type de lignes (aériennes/souterraines), nombre de clients alimentés, capacité d'isolement des pannes, états des équipements, etc.), environnementale (état de la végétation, distance des emprises, etc.), caractéristiques de l'événement météorologique (fréquence, ampleur, durée, zone, etc.), organisationnelle (politique de rétablissement, nombre d'équipes disponibles, expérience des intervenants, etc.), sociale (impact sur les clients, préparation face aux

durées des interruptions, etc.), économique (budget de réserve, disponibilité des équipements destinés aux remplacement, etc.). Après avoir obtenue la base des connaissances, il sera question de faire l'analyse du système de distribution électrique d'Hydro-Québec.

#### 5.9.3. Analyse du système

L'analyse de la base de connaissances dans la section précédente permet de conclure que les systèmes électriques font partie des systèmes complexes. Elle est présentée à la figure 4.3. En effet, quand un système n'est pas défini comme système complexe, il est considéré comme linéaire au sens large c'est-à-dire qu'à partir des connaissances approfondies sur le système, il est possible d'y fonder une base solide de connaissances sur les causes et les conséquences de ses perturbations. Ces dernières sont vus par rapport aux forts impacts sur la vie économique, organisationnelle, sociale en plus des défis technologiques.

En outre, si un système est complexe, alors il est défini comme suit sur la base de la définition de Jensen et Aven (2018) : « *ce sont des systèmes où les connaissances sur les causes et les conséquences de leurs perturbations ou leurs comportements sont médiocres même s'il existe des connaissances approfondies sur leurs composants et leurs interactions et ce, qu'importe le nombre de ceux-ci* ». Sur la base des connaissances disponibles de la section précédente de ce document, il peut être affirmé que les systèmes électriques sont des système complexes. Après avoir fait l'analyse du système, il sera question de faire l'évaluation de la base de connaissance.

#### 5.9.4. Évaluation de la base de connaissances, analyse des hypothèses et de ses sensibilités

- *Hypothèses posées :*

H0 : les données historiques du passé peuvent représenter les évènements du futur en contexte des évènements climatiques pour que les lignes aériennes deviennent une solution durable à long terme lorsque des programmes de gestion de la végétation, de durcissement des éléments structurels du réseau électrique et de mécanisme de récupération des charges

d'exploitation, associés (attribution de budget de réserve et de continuité de service) aux pannes majeures soient mises en place.

-H1 : les données historiques du passé ne peuvent pas représenter les évènements futurs en contexte des évènements climatiques mais l'enfouissement des lignes est une solution durable à long terme face à ces évènements.

Cette évaluation est présentée par la figure 4.4 du cadre de prise de décision. Sur la base des directions de Flage et Aven (2009, pp. 13-14), l'évaluation de la base de connaissances pour l'étude de cas peut être scindée en deux catégories à savoir :

- a) incertitude significative (les lignes de distribution du réseau électrique sont aériennes);

les conditions suivantes sont remplies :

- les phénomènes impliqués ne sont pas bien compris; les modèles sont inexistant ou connus/supposés donner de mauvaises prévisions : c'est le cas pour les évènements climatiques extrêmes;
- les hypothèses retenues représentent de fortes simplifications : c'est le cas de l'hypothèse H0 (étaillée dans l'analyse de sensibilité des hypothèses);
- les données historiques ne sont pas toutes disponibles : c'est le cas pour les données historiques sur les coûts des évènements majeurs dans le cadre du service de distribution du réseau H-Q. Même si plus de données étaient disponibles pour cette étude, cela ne diminuerait en rien le fait que dans le contexte des changements climatiques majeurs, puisqu'il est très probable que les données du passé ne soient pas représentatives des futurs scénarios climatiques ainsi que leurs évènements extrêmes (IPCC, 2014);
- il y a un manque d'accord parmi les experts sur la résilience économique, technique, organisationnelle et sociale, sur la stratégie de garder les lignes aériennes face aux changements climatiques. Se référer aux littératures de Arghandeh et al. (2014); Glass et Glass (2019); Larsen (2016); Mueller et al. (2019); Yuan et al. (2018); Zamuda,

Larsen, et al. (2019). D'autre part, il n'y a pas eu de consensus des décideurs sur le programme de réduction de l'effet des activités humaines sur les changements climatiques et non plus lors de la COP25 à Madrid sur la façon de gérer l'émission des GES (gaz à effet de serre) soit, l'une des principales causes responsables de l'effet de l'activité humaine sur le dérèglement climatique.

b) Incertitude modérée (les lignes de distribution du réseau électrique sont souterraines);

les conditions suivantes sont remplies:

- les phénomènes impliqués causes, ampleurs perturbations, lieux, etc. de certains phénomènes météorologiques) ne sont pas bien compris, mais les modèles utilisés sont considérés comme simples/bruts : c'est le cas pour les changements climatiques;
- il n'existe que quelques données disponibles qui sont peu fiables : les données obtenues *via* les relations pour des études dans d'autres entreprises peuvent aboutir à des estimations biaisées (Glass et Glass, 2019);
- les hypothèses retenues représentent de fortes simplifications : c'est l'hypothèse H1

il y a un large consensus parmi les experts sur le fait que des lignes enfouies soient plus résilientes aux changements climatiques que des lignes aériennes. Se référer aux articles tels que Glass et Glass (2019); Larsen (2016); Zamuda, Larsen, et al. (2019). Une fois, l'évaluation de la connaissance est terminée, dans la prochaine section, il sera question d'abordé l'évaluation globale des risques.

#### **5.9.5. Évaluation globale des risques**

Elle est présentée par la figure 4.5. Une analyse de sensibilité des coûts-avantages des hypothèses devrait faire orienter des lignes directives pour aboutir à la stratégie de gestion de risque la plus appropriée face aux changements climatiques en contexte des lignes de distribution électrique. **Analyse de sensibilité hypothèse H0 :**

Elle consiste à gérer les conséquences de l'impact des changements climatiques sur les lignes de distribution d'H-Q (Hydro-Québec) à travers des programmes de gestion de la

végétation, de durcissement des éléments structurels du réseau électrique et de mécanisme de récupération des charges d'exploitation associées aux pannes majeures (budget économique de réserve et de continuité de service pour les événements extrêmes). C'est une stratégie de gestion de la résilience en contexte des perturbations causées par le changement climatique.

Considérons les résultats de l'annexe D (confidentiel), les périodes de retour calculées permettent d'avoir une conjoncture de l'évolution des coûts qui leurs seront attribués du fait que le contexte des changements climatiques, les événements du passé ne sont pas nécessairement représentatifs des événements du futur. L'augmentation des fréquences, durées et ampleurs dues aux changements climatiques fait que leur période de retour se rétrécira pour ainsi augmenter ladite période de retour et les coûts de leurs conséquences hausseront également. Les impacts importants des changements climatiques sur Hydro-Québec sont présentés à l'annexe F.

Dans ce contexte de profonde incertitude face aux conséquences des événements climatiques, il y a lieu de reconnaître que le durcissement des lignes et le mécanisme de planification de budget de réserve pour les activités de continuité des services face aux perturbations, jouent un rôle majeur. Cependant, l'efficacité à long terme de ces mécanismes qui ne cesseront de voir hausser leurs investissements sous un angle de durabilité, au vu des incertitudes profondes qui entourent l'évolution de ces changements, causera de plus en plus de défis.

De plus, il y a une incertitude sur ces périodes de retour des événements extrêmes car avec le dérèglement climatique, les événements du passé ne sont pas totalement représentatifs des futurs scénarios en termes d'ampleur, d'intensité, de fréquence et de durée. Sur ces faits, Reid (1992) souligne qu'il y une tendance à la sous-estimation des incertitudes en contexte des systèmes complexes malgré le fait qu'il y ait une observation que les bases de connaissances au sein de ces systèmes sont médiocres (Zio et Aven, 2011). De plus les investissements en aérien devraient être considérés comme des coûts perdus (Glass et Glass, 2019).

### **Analyse de sensibilité hypothèse H1 :**

Les études ont montré que les changements climatiques majeurs augmenteront les avantages estimés de l'enfouissement des lignes (Larsen, 2016). Les mises en sous-sol des lignes ne peuvent être justifiées que lorsque la volonté des clients de payer davantage est incluse dans les paramètres des études (Glass et Glass, 2019). Une approche pratique pour estimer le nombre de pannes sur une ligne souterraine consisterait à soustraire les pannes liées aux conditions météorologiques, à la végétation et la panne liée aux accidents provoqués par la faune sur le nombre de pannes moyen sur une ligne aérienne (Glass et Glass, 2019).

Les avantages d'un système électrique en souterrain par rapport aux lignes aériennes (Zamuda, Larsen, et al., 2019) sont:

- réduction de la fréquence des interruptions : diminution des coûts liés à la restauration et au remplacement d'actifs ainsi que la perte de revenus. Par exemple, la tempête automnale de 2019 a coûté à elle seule, 30 M\$ alors que dans le futur, les événements extrêmes liés au changement climatique vont s'accroître en coûts, fréquence, durée et intensité;
- évitement des coûts de végétation pour le service de distribution;
- éviter la responsabilité légale aux dommages et blessures;
- offrir de meilleurs avantages esthétiques, une meilleure relation avec les communautés et la satisfaction des clients;
- éviter pour ses clients, les inconvénients direct et indirect de perdre l'alimentation en électricité à tous les phénomènes météorologiques extrêmes;
- éviter l'impact des coupures prolongées sur les systèmes critiques fortement dépendants des systèmes électriques;
- augmentation des avantages sociaux *via* la réduction des événements suivants : les blessures et les décès, les incendies de forêt, le taux de mortalité des animaux de la

faune qui peuvent être en contact avec les lignes de distribution, l'impact négatif sur l'environnement (évitement de la gestion de la végétation).

Au-delà des éléments mentionnés précédemment, d'après l'annexe E (confidentiel), les lignes souterraines ont les caractéristiques suivantes :

- une durée de vie moins élevée par rapport aux lignes aériennes concernant les éléments principaux des structures;
- un coût de réparation plus élevé par rapport à l'aérien;
- un temps de réparation plus élevé par rapport à l'aérien;
- un taux de pannes moins élevé avec un ratio de 2.91 par rapport à l'aérien en MT (Moyenne Tension) et 16.6055 en BT (Basse Tension) au 100 km;
- un taux d'interruption planifié plus élevé avec un ratio de 0.6117 par rapport à l'aérien en MT et moins élevé avec un ratio de 4.0435 en BT au 100 km.

La prochaine section débouchera sur la dernière étape du cadre à savoir la revue, jugement et prise de décision finale.

#### 5.9.6. Revue, jugement et prise de décision

Elle est présenté par la figure 4.6. Cette section s'aligne avec le fait que les principes de décision ne peuvent pas seulement se limiter sur les bases techniques et quantitatives (Renn, 1998). Il devient indispensable de voir au-delà même des analyses et des résultats des évaluations du risque car en contexte de profondes incertitudes, les hypothèses et la base de connaissances disponibles peuvent contenir de nombreuses limites (Aven, 2013a).

#### 5.10. Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en application le modèle de prise de décision développé dans le chapitre 4. Il a de même permis de quantifier la résilience, une étape clef dans le cadre de gestion de la résilience.

## CONCLUSION

La gestion des actifs vise à concrétiser les objectifs stratégiques d'un organisme par le biais d'approches qui reposent sur une logique d'équilibrage entre les coûts, risques et performances des actifs. Toutefois, dans le contexte des incertitudes qui entourent les changements climatiques et de leurs impacts sur les systèmes de distribution de réseaux électriques, l'acceptabilité de la base de connaissances et des hypothèses, la caractérisation du comportement du système d'actifs, les besoins et attentes des parties prenantes ainsi que les types de perturbations à inclure dans les analyses, créent des défis dans sa prise de décision. Par conséquent, des modèles de prise de décision en gestion des actifs qui utilisent la complémentarité entre la gestion du risque traditionnelle, la gestion du risque sous incertitudes et la gestion de la résilience qui corroborent tous ces facteurs, permettront de contribuer à relever ce défi.

Ainsi, le développement d'un cadre de prise de décision approprié pour remédier aux défis mentionnés, constitue le principal objectif de cette étude. En ce sens, elle cherche à élaborer des approches d'augmentation de la résilience dans le contexte des réseaux électriques. Un cadre de prise de décision sous risque, incertitude et résilience a été développé. Une étude de cas appliquée dans le contexte du réseau de distribution d'Hydro-Québec a été utilisé pour démontrer son applicabilité.

Les analyses dans cette étude ont été faites par le biais de l'évaluation des coûts-avantages d'avoir des lignes de distributions aériennes ou souterraines (enfouies). Elles présentent des limites du fait que les coûts et caractéristiques techniques attribuées à ces deux stratégies ne sont pas utilisés pour des structures complètes d'une lignes aériennes ou souterraines dans une zone donné. C'est-à-dire que les coûts et caractéristiques n'ont pas été estimés sur la base de structures représentatives d'une installation au complet dans un lieu donné. Ce sont juste les éléments principaux de ces structures qui ont été utilisés. Toutefois, dans l'analyse des modèles des coûts des pannes majeurs, ce sont les coûts investis sur l'ensemble du réseau de distribution qui ont été utilisés.

En outre, des évaluations transparentes des coûts et avantages de la mise en souterrain et des programmes de durcissement et de planification de budget de réserve, sont utiles aux décideurs pour permettre de statuer sur les approches les plus appropriées parmi celles de la résilience à long terme des systèmes électriques (Larsen, 2016). Ces évaluations trouvent leurs causes par le constat que plusieurs études limitent l'aspect d'enfouir les lignes ou de les laisser en aérien aux aspects techniques et quantitatifs, notamment l'aspect économique. En ce sens, Renn (1998) souligne que ces évaluations ne devraient pas être les seuls critères pour fonder une base solide de prise de décision au sein des systèmes complexes.

En sus, il n'y a pas eu de consensus des décideurs lors la COP25 (25<sup>e</sup> conférence des parties des pays signataires de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) à Madrid, en date de décembre 2019, sur la façon d'atténuer les émissions des GES (Gaz à Effet de Serre). Ces émissions constituent la principale cause responsable de l'effet de l'activité humaine sur le dérèglement climatique (IPCC, 2014). Par conséquent, rien ne laisse présager un ralentissement des changements climatiques ainsi que leurs événements météorologiques extrêmes. Ces derniers sont les principaux responsables des pannes majeures en contexte des systèmes électriques (Larsen, 2016; Tomaszewski et Ruszczak, 2013). À ces incertitudes, se rajoute le fait qu'il y ait un potentiel de surprise élevé, une base de connaissances médiocre et une cascade d'événements à fort impact qu'engendrent les événements extrêmes au sein des systèmes complexes (Zio et Aven, 2013).

De plus, il y a une montée récurrente d'appels pour l'enfouissement des lignes du réseau électriques à chaque évènement météorologique extrême (Glass et Glass, 2019). Dans ce contexte, quelles sont les causes, les conséquences, les implications, l'acceptabilité et la viabilité des moyens pour remédier à ces appels de la part des parties prenantes des services publics d'électricité ? En ce sens, des avancées majeures ont été atteintes au sein du service de distribution d'Hydro-Québec. Par exemple, l'expertise organisationnelle s'est développée au court du temps pour faire face aux évènement majeurs, l'augmentation des connaissances sur les tendances et les conséquences des changements climatiques notamment l'indice actuariel climatique, ont eu comme effet, une meilleure préparation et

une meilleure adaptation face aux événements météorologiques extrêmes et le soutien financier des municipalités dans leurs efforts d'enfouissement des lignes *via* le « programme Embellir », etc. Ces avancées ont eu comme conséquence, la réduction de l'indice de durée d'interruption moyenne du client (*Customer Average Interruption Duration Index « CAIDI »*) présenté à l'annexe H. Il en résulte une diminution de la durée des interruptions et du temps de réaction du service de distribution d'Hydro-Québec.

Toutefois, à l'ère de profondes incertitudes à long terme de l'évolution de l'impact des événements météorologiques extrêmes sur les réseaux de distribution électrique, il y a lieu d'approfondir les réflexions pour jeter de nouvelles bases solides de prise de décision sur la façon d'aborder la gestion de la résilience par des mécanismes plus élargis et plus inclus des parties prenantes par le biais des stratégies de la gestion d'actifs. Cette gestion des actifs devrait se contextualiser pour chaque organisme en tenant compte de ses contraintes techniques, opérationnelles, sociales, économiques et environnementales ainsi que de leurs interconnexions. Elle devrait également intégrer les opinions et implications de toutes ses parties prenantes et ce, avec l'incorporation de l'évolution des incertitudes, des connaissances, des valeurs sociales et des horizons temporels. Sur ce, les résultats de cette étude pourront servir de base sur laquelle reposeront d'autres études et réflexions plus approfondies pour mieux informer les décideurs et les parties prenantes des services publics d'électricité tel qu'Hydro-Québec, sur les incertitudes encourues et les implications à entreprendre.

**Annexe A (confidentielle) - Coût des pannes majeures, leurs clients heures-interruptions (CHI) et leurs jours évènement extrême, Hydro Québec distribution.**

**Annexe B (confidentielle) - Données sur la détermination des paramètres Gumbel &  
Graphique Gumbel pour les investissements annuels dans les pannes majeures en  
aérien**

## Annexe C – Données, test Kolmogorov-Smirnov et Anderson-Darling

### Données du test de Kolmogorov-Smirnov

Rang selon investissement classé par ordre croissant	F(xi)	i/n	$\left  \frac{i}{n} - F(xi) \right $	(i-1)/n	$\left  F(xi) - \frac{i-1}{n} \right $
1	0,1219	0,0909	0,0310	0,0000	0,1219
2	0,1333	0,1818	0,0486	0,0909	0,0423
3	0,2256	0,2727	0,0471	0,1818	0,0438
4	0,2502	0,3636	0,1134	0,2727	0,0225
5	0,4670	0,4545	0,0124	0,3636	0,1033
6	0,4746	0,5455	0,0708	0,4545	0,0201
7	0,5074	0,6364	0,1290	0,5455	0,0381
8	0,5721	0,7273	0,1552	0,6364	0,0643
9	0,8206	0,8182	0,0024	0,7273	0,0933
10	0,8518	0,9091	0,0573	0,8182	0,0336
11	0,9586	1,0000	0,0414	0,9091	0,0495

### Données du test d'Anderson-Darling en aérien

Rang selon investissement classé par ordre croissant	F(xi)	(2i-1)/n	ln(F(i))	ln (1-F(n+1-i))	$S_i$
1	0,1219	0,0909	-2,1046	-3,1847	-0,4808
2	0,1333	0,2727	-2,0155	-1,9089	-1,0703
3	0,2256	0,4545	-1,4889	-1,7179	-1,4577
4	0,2502	0,6364	-1,3854	-0,8488	-1,4217
5	0,4670	0,8182	-0,7615	-0,7080	-1,2023
6	0,4746	1,0000	-0,7452	-0,6437	-1,3889
7	0,5074	1,1818	-0,6785	-0,6292	-1,5455
8	0,5721	1,3636	-0,5585	-0,2880	-1,1543
9	0,8206	1,5455	-0,1978	-0,2557	-0,7008
10	0,8518	1,7273	-0,1604	-0,1430	-0,5242
11	0,9586	1,9091	-0,0423	-0,1300	-0,3289
				$S = \sum_i^n S_i$	-11,2753
				$A^2 = -n - S$	10,2753

**Annexe D (confidentielle) - Période de retour des investissements dans les pannes majeures en aériens**

**Annexe E (confidentielle) - Ratio des coûts, taux interruption, durée de vie et coût de remplacement des principaux éléments entre la structure aérienne et la structure souterraine ainsi que les coûts liés à la gestion de la végétation**

**Annexe F - Impacts importants des changements climatiques et leurs conséquences pour Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2017, p. 64; 2018, p. 49)**

Impacts importants	Conséquences et options
Augmentation de l'hydraulicité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modification de la gestion des réservoirs</li> <li>• Suréquipement des centrales</li> </ul>
Hausse des inondations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modification de la gestion des réservoirs</li> </ul>
Dépassement de la limite thermique des conducteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction du transit sur les lignes (transport &amp; distribution)</li> <li>• Augmentation de la hauteur des supports (dégagement plus grand en raison de l'expansion thermique des conducteurs)</li> </ul>
Diminution de la capacité de refroidissement des groupes turbine-alternateur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajout de climatisation dans les centrales</li> </ul>
Augmentation de la croissance de la végétation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modification des pratiques de maîtrise de la végétation</li> </ul>
Augmentation de la vulnérabilité des équipements en raison des charges supplémentaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Révision des normes de conception</li> </ul>

**Annexe H - Indice de durée d'interruption moyenne du client (Customer Average Interruption Duration Index « CAIDI »)**

Année	CAIDI (Indice de durée d'interruption moyenne du client) en minutes			
	Hydro-Québec	IEEE MIN	IEEE MEDIANE	IEEE max
2014	80	68	110	248
2015	83	80	111	211
2016	77	77	111	212
2017	94	61	113	231

Les durées inscrites au tableau incluent les interruptions planifiées et les interruptions causées par les pertes d'alimentation.

## RÉFÉRENCES

- Alderson, D. L., Brown, G. G., & Carlyle, W. M. (2015). Operational Models of Infrastructure Resilience. *Risk Analysis*, 35(4), 562-586. doi:doi:10.1111/risa.12333
- Aldunce, P., Beilin, R., Howden, M., & Handmer, J. (2015). Resilience for disaster risk management in a changing climate: Practitioners' frames and practices. *Global Environmental Change*, 30, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.10.010>
- Altabakh, H., AlKazimi, M. A., Murray, S., & Grantham, K. (2014). STAMP – Holistic system safety approach or just another risk model? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 109-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.07.010>
- Arghandeh, R., Brown, M., Rosso, A. D., Ghatikar, G., Stewart, E., Vojdani, A., & Meier, A. v. (2014). The Local Team: Leveraging Distributed Resources to Improve Resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, 12(5), 76-83. doi:10.1109/MPE.2014.2331902
- Aven, T. (2013a). On How to Deal with Deep Uncertainties in a Risk Assessment and Management Context. *Risk Analysis*, 33(12), 2082-2091. doi:10.1111/risa.12067
- Aven, T. (2013b). On the meaning of a black swan in a risk context. *Safety Science*, 57, 44-51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.01.016>
- Aven, T. (2015). Implications of black swans to the foundations and practice of risk assessment and management. *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 83-91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.10.004>
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Aven, T. (2017). How some types of risk assessments can support resilience analysis and management. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 536-543. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.07.005>
- Aven, T. (2018). The Call for a Shift from Risk to Resilience: What Does it Mean? *Risk Analysis*.
- Aven, T., Baraldi, P., Flage, R., & Zio, E. (2013). *Uncertainty in risk assessment: the representation and treatment of uncertainties by probabilistic and non-probabilistic methods*: John Wiley & Sons.
- Aven, T., & Kristensen, V. (2019). How the distinction between general knowledge and specific knowledge can improve the foundation and practice of risk assessment and risk-informed decision-making. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106553. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106553>
- Aven, T., Renn, O., & Rosa, E. A. (2011). On the ontological status of the concept of risk. *Safety Science*, 49(8), 1074-1079. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.04.015>
- Aven, T., & Zio, E. (2011). Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(1), 64-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.06.001>
- Aven, T., & Zio, E. (2014). Foundational Issues in Risk Assessment and Risk Management. *Risk Analysis*, 34(7), 1164-1172. doi:10.1111/risa.12132
- Ayyub, B. M. (2014). Systems Resilience for Multihazard Environments: Definition, Metrics, and Valuation for Decision Making. *Risk Analysis*, 34(2), 340-355. doi:10.1111/risa.12093
- Badreddine, A., & Amor, N. B. (2013). A Bayesian approach to construct bow tie diagrams for risk evaluation. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(3), 159-171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.03.005>

- Badurdeen, F., Shuaib, M., & Liyanage, J. P. (2012). Risk modeling and analysis for sustainable asset management. In *Engineering Asset Management and Infrastructure Sustainability* (pp. 61-75): Springer.
- Baskarada, S., Gao, J., & Koronios, A. (2005). Agile maturity model approach to assessing and enhancing the quality of asset information in engineering asset management information systems.
- Batrouni, M., Bertaix, A., & Nicolle, C. (2018). Scenario analysis, from BigData to black swan. *Computer Science Review*, 28, 131-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.02.001>
- Baybutt, P. (2015). A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 52-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.010>
- Baybutt, P. (2018). On the completeness of scenario identification in process hazard analysis (PHA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, 492-499. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.05.010>
- Bell, R. A. (2006). *Option Pricing with the Extreme Value Distributions*. University of London,
- Ben-Haim, Y. (2012). Why risk analysis is difficult, and some thoughts on how to proceed. *Risk Analysis: An International Journal*, 32(10), 1638-1646.
- Bhamra, R., Dani, S., & Burnard, K. (2011). Resilience: the concept, a literature review and future directions. *International Journal of Production Research*, 49(18), 5375-5393.
- Bjerga, T., & Aven, T. (2015). Adaptive risk management using new risk perspectives – an example from the oil and gas industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 75-82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.10.013>
- Bjerga, T., Aven, T., & Zio, E. (2016). Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering & System Safety*, 156, 203-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.004>
- Bjørnson, K., Jensen, A., & Aven, T. (2018). Using qualitative types of risk assessments in conjunction with FRAM to strengthen the resilience of systems. *Journal of Risk Research*. doi:10.1080/13669877.2018.1517382
- Bohórquez Arévalo, L. E., & Espinosa, A. (2015). Theoretical approaches to managing complexity in organizations: A comparative analysis. *Estudios Gerenciales*, 31(134), 20-29. doi:<https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.10.001>
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity. ISBN-10, 195131592.
- Bostick, T. P., Connelly, E. B., Lambert, J. H., & Linkov, I. (2018). Resilience science, policy and investment for civil infrastructure. *Reliability Engineering & System Safety*, 175, 19-23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.025>
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., . . . Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.
- Brusset, X., & Teller, C. (2017). Supply chain capabilities, risks, and resilience. *International Journal of Production Economics*, 184, 59-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.008>
- Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., Diao, K., Farmani, R., & Fu, G. (2017). Reliable, resilient and sustainable water management: the Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 1(1), 63-77.
- Byrne, D., & Callaghan, G. (2013). *Complexity theory and the social sciences: The state of the art*: Routledge.

- Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoas, A. P. F. D., Relvas, S., & Novais, A. Q. (2014). Resilience assessment of supply chains under different types of disruption. In M. R. Eden, J. D. Sirola, & G. P. Towler (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 34, pp. 759-764): Elsevier.
- Carpenter, S., Walker, B., Andries, J. M., & Abel, N. (2001). From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, 4(8), 765-781.
- Cassottana, B., Shen, L., & Tang, L. C. (2019). Modeling the recovery process: A key dimension of resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 190, 106528. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106528>
- Catanach Jr, A. H., & Ragatz, J. A. (2010). 2008 Market Crisis: Black Swan, Perfect Storm or Tipping Point? *Bank Accounting & Finance*, 23(08943958), 20-26.
- Cerè, G., Rezgui, Y., & Zhao, W. (2017). Critical review of existing built environment resilience frameworks: Directions for future research. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25, 173-189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.018>
- Chen, H., & Zhao, T. (2020). Modeling power loss during blackouts in China using non-stationary generalized extreme value distribution. *Energy*, 195, 117044. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117044>
- Chen, J., Zhong, P.-A., An, R., Zhu, F., & Xu, B. (2019). Risk analysis for real-time flood control operation of a multi-reservoir system using a dynamic Bayesian network. *Environmental Modelling & Software*, 111, 409-420. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.007>
- Cheraghi, M., Eslami Baladeh, A., & Khakzad, N. (2019). A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMA-HAZOP): Application to gas wellhead facilities. *Safety Science*, 114, 12-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.024>
- Clark-Ginsberg, A., Abolhassani, L., & Rahmati, E. A. (2018). Comparing networked and linear risk assessments: From theory to evidence. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, 216-224. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.031>
- Craig, C. (2018). Risk management in a policy environment: The particular challenges associated with extreme risks. *Futures*, 102, 146-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.04.001>
- CUAHSI. (2020, 06 january 2020). Plotting the Flood Frequency Curve using Gumbel Distribution. Consulted 06 january 2020
- Daryani, S. M., & Amini, A. (2016). Management and Organizational Complexity. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 230, 359-366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.09.045>
- Davis, J. P., Eisenhardt, K. M., & Bingham, C. B. (2009). Optimal structure, market dynamism, and the strategy of simple rules. *Administrative Science Quarterly*, 54(3), 413-452.
- Dekker, S., Cilliers, P., & Hofmeyr, J.-H. (2011). The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. *Safety Science*, 49(6), 939-945. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.01.008>
- Denning, R. S., & Budnitz, R. J. (2018). Impact of probabilistic risk assessment and severe accident research in reducing reactor risk. *Progress in Nuclear Energy*, 102, 90-102. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.05.021>
- Drouin, M., Gilbertson, A., Parry, G., Lehner, J., Martinez-Guridi, G., Lachance, J., & Wheeler, T. (2017). *Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-informed Decision Making: Final Report*: Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Office ....
- Edwards, R. (2016). Developing world-class asset management capability to deliver value to stakeholders. In: The Institute of Asset Management.
- Eisenberg, D. A., Linkov, I., Park, J., Bates, M. E., Fox-Lent, C., & Seager, T. P. (2014). Resilience metrics: lessons from military doctrines. *Solutions*, 5(5), 76-87.

- El-Akruti, K., Dwight, R., & Zhang, T. (2013). The strategic role of Engineering Asset Management. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 227-239. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.002>
- El-Gheriani, M., Khan, F., Chen, D., & Abbassi, R. (2017). Major accident modelling using spare data. *Process Safety and Environmental Protection*, 106, 52-59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.12.004>
- Environnement-Canada. (2019). Canada's top 10 weather stories of 2019. doi:<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/top-ten-weather-stories/2019.html>
- Etinay, N., Egbu, C., & Murray, V. (2018). Building Urban Resilience for Disaster Risk Management and Disaster Risk Reduction. *Procedia Engineering*, 212, 575-582. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.074>
- Fattah, R., & Khalilzadeh, M. (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*, 102, 290-300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.018>
- Figueroa-Candia, M., Felder, F. A., & Coit, D. W. (2018). Resiliency-based optimization of restoration policies for electric power distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 161, 188-198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.04.007>
- Fischi, J., & Nichiani, R. (2015). Complexity Based Risk Evaluation in Engineered Systems. *Procedia Computer Science*, 44, 31-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.044>
- Flage, R., & Aven, T. (2009). Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis. *Reliability: Theory & Applications*, 4(2-1 (13)).
- Florin, M.-V., & Bürkler, M. T. (2017). *Introduction to the IRGC Risk Governance Framework*. Retrieved from
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253-267.
- Francis, R., & Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90-103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.004>
- Gallopin, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293-303. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>
- Giang, P. H. (2015). Decision making under uncertainty comprising complete ignorance and probability. *International Journal of Approximate Reasoning*, 62, 27-45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2015.05.001>
- Gin, J. L., Stein, J. A., Heslin, K. C., & Dobalian, A. (2014). Responding to risk: Awareness and action after the September 11, 2001 terrorist attacks. *Safety Science*, 65, 86-92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.01.001>
- Giraud, L., & Galy, B. (2018). Fault tree analysis and risk mitigation strategies for mine hoists. *Safety Science*, 110, 222-234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.010>
- Glass, E., & Glass, V. (2019). Underground power lines can be the least cost option when study biases are corrected. *The Electricity Journal*, 32(2), 7-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.01.015>
- Goerlandt, F., & Reniers, G. (2017). Evidence assessment schemes for semi-quantitative risk analyses: A response to Roger Flage and Terje Aven. *Safety Science*, 98, 12-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.04.008>

- Gómez, Y. M., Bolfarine, H., & Gómez, H. W. (2019). Gumbel distribution with heavy tails and applications to environmental data. *Mathematics and Computers in Simulation*, 157, 115-129. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.10.003>
- Goodwin, P., & Wright, G. (2010). The limits of forecasting methods in anticipating rare events. *Technological forecasting and social change*, 77(3), 355-368.
- Guo, C., Khan, F., & Imtiaz, S. (2018). Risk assessment of process system considering dependencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, 204-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.06.014>
- Haimes, Y. Y. (2009). On the Definition of Resilience in Systems. *Risk Analysis*, 29(4), 498-501. doi:10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x
- Hansson, S. O., & Aven, T. (2014). Is Risk Analysis Scientific? *Risk Analysis*, 34(7), 1173-1183. doi:10.1111/risa.12230
- Hashemi, S. J., Ahmed, S., & Khan, F. I. (2014). Risk-based operational performance analysis using loss functions. *Chemical Engineering Science*, 116, 99-108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.04.042>
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20.
- Hastings, N. A. J. (2015). *Physical Asset Management: With an Introduction to ISO55000*: Springer.
- 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*. Paper presented at the 2008 First International Conference on Infrastructure Systems and Services: Building Networks for a Brighter Future (INFRA).
- Helbing, D. (2013). Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 497(7447), 51.
- Henriques de Gusmão, A. P., Mendonça Silva, M., Poletto, T., Camara e Silva, L., & Cabral Seixas Costa, A. P. (2018). Cybersecurity risk analysis model using fault tree analysis and fuzzy decision theory. *International Journal of Information Management*, 43, 248-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.08.008>
- Henry, D., & Emmanuel Ramirez-Marquez, J. (2012). Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 114-122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.09.002>
- Henry, D., & Ramirez-Marquez, J. E. (2012). Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 114-122.
- Herrera, I. A., & Woltjer, R. (2010). Comparing a multi-linear (STEP) and systemic (FRAM) method for accident analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(12), 1269-1275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.06.003>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
- Holling, C. S., & Gunderson, L. H. (2002). Resilience and adaptive cycles. In: *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, 25-62.
- Hollnagel, E. (2013). *Resilience engineering in practice: A guidebook*: Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E., Nemeth, C. P., & Dekker, S. (2008). *Resilience engineering perspectives: remaining sensitive to the possibility of failure* (Vol. 1): Ashgate Publishing, Ltd.
- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006>

- Hussain, A., Bui, V.-H., & Kim, H.-M. (2019). Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied Energy*, 240, 56-72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.055>
- Hydro-Québec. (2017). *Rapport sur le développement durable 2017*. Retrieved from <http://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-developpement-durable-2017.pdf>
- Hydro-Québec. (2018). *Rapport sur le développement durable 2018*. Retrieved from <http://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-developpement-durable.pdf>
- Hydro-Québec. (2020). Hydro-Québec, un chef de file des énergies renouvelables. Consulted 26 february 2020 from <http://www.hydroquebec.com/international/fr/a-propos/>
- IAM. (2015). Asset Management - une anatomie. Consulted from <https://theiam.org/knowledge/Knowledge-Base/the-anatomy/>
- IIMM. (2006). International Infrastructure Management Manual—Australia/New Zealand Edition. In: Version.
- IPCC. (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate change 2014 synthesis report. doi:[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)
- ISO-22300. (2018). Sécurité et résilience — Vocabulaire. Consulted
- ISO-31000. (2018). Management du risque — Lignes directrices. Consulted from <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:fr>
- ISO-55000. (2014). Gestion d'actifs — Aperçu général, principes et terminologie.
- ISO-55001. (2014). Gestion d'actifs-Systèmes de management-Exigences. In: ISO.
- Jain, P., Mentzer, R., & Mannan, M. S. (2018). Resilience metrics for improved process-risk decision making: Survey, analysis and application. *Safety Science*, 108, 13-28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.012>
- Jain, P., Pasman, H. J., Waldram, S., Pistikopoulos, E. N., & Mannan, M. S. (2018). Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 61-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.006>
- Jain, P., Rogers, W. J., Pasman, H. J., Keim, K. K., & Mannan, M. S. (2018). A Resilience-based Integrated Process Systems Hazard Analysis (RIPSHA) approach: Part I plant system layer. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 92-105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.016>
- Jensen, A., & Aven, T. (2018). A new definition of complexity in a risk analysis setting. *Reliability Engineering & System Safety*, 171, 169-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.018>
- Johansen, I. L., & Rausand, M. (2014). Defining complexity for risk assessment of sociotechnical systems: A conceptual framework. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(3), 272-290. doi:10.1177/1748006X13517378
- Jordan, H. T., Stein, C. R., Li, J., Cone, J. E., Stayner, L., Hadler, J. L., . . . Farfel, M. R. (2018). Mortality among rescue and recovery workers and community members exposed to the September 11, 2001 World Trade Center terrorist attacks, 2003–2014. *Environmental Research*, 163, 270-279. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.004>
- Journaldemontréal. (2019). Tempête automnale: une facture de 30 M\$ pour Hydro-Québec. Consulted 21 february 2020 from <https://www.journaldemontréal.com/2019/12/05/tempete-automnale-une-facture-de-30-m-pour-hydro-quebec>

- Jufri, F. H., Widiputra, V., & Jung, J. (2019). State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies. *Applied Energy*, 239, 1049-1065. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.017>
- Kantha, L. (2013). Classification of hurricanes: Lessons from Katrina, Ike, Irene, Isaac and Sandy. *Ocean Engineering*, 70, 124-128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.06.007>
- Karanki, D. R., & Dang, V. N. (2016). Quantification of Dynamic Event Trees – A comparison with event trees for MLOCA scenario. *Reliability Engineering & System Safety*, 147, 19-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.017>
- Keynes, J. M. (2013). *A treatise on probability*: Courier Corporation.
- Khan, F., Hashemi, S. J., Paltrinieri, N., Amyotte, P., Cozzani, V., & Reniers, G. (2016). Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 14, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.07.006>
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (2002). A criterion for developing credible accident scenarios for risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(6), 467-475. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00050-5)
- Khuntia, S. R., Rueda, J. L., Bouwman, S., & van der Meijden, M. A. (2016). A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 26(10), 2123-2133.
- Komljenovic, D., Gaha, M., Abdul-Nour, G., Langheit, C., & Bourgeois, M. (2016). Risks of extreme and rare events in Asset Management. *Safety Science*, 88, 129-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.05.004>
- Komonen, K., Kortelainen, H., & Räikkonen, M. (2006). An asset management framework to improve longer term returns on investments in the capital intensive industries. In *Engineering Asset Management* (pp. 418-432): Springer.
- Kortelainen, H., Reunanen, M., & Uusitalo, T. (2015). *Sustainability improvements through efficient asset management networks*. Paper presented at the Proceedings of the 7th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2012).
- Kościelny, J. M., Syfert, M., Fajdek, B., & Kozak, A. (2017). The application of a graph of a process in HAZOP analysis in accident prevention system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 55-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.09.003>
- Labib, A., & Read, M. (2015). A hybrid model for learning from failures: The Hurricane Katrina disaster. *Expert Systems with Applications*, 42(21), 7869-7881. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.06.020>
- Lacroix, T., & Stevenin, P. (2016). Strategic asset management: a system driven approach on electrical transmission systems. *IEEE-Reliability Society*.
- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67. doi:10.1007/s13194-012-0056-8
- Larsen, P. H. (2016). A method to estimate the costs and benefits of undergrounding electricity transmission and distribution lines. *Energy Economics*, 60, 47-61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.09.011>
- Li, X., Chen, G., Jiang, S., He, R., Xu, C., & Zhu, H. (2018). Developing a dynamic model for risk analysis under uncertainty: Case of third-party damage on subsea pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 289-302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.05.001>
- Lin, Y., Bie, Z., & Qiu, A. (2018). A review of key strategies in realizing power system resilience. *Global Energy Interconnection*, 1(1), 70-78. doi:<https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.009>

- Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., . . . Nathwani, J. (2014). Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, 4(6), 407.
- Linkov, I., Eisenberg, D. A., Plourde, K., Seager, T. P., Allen, J., & Kott, A. (2013). Resilience metrics for cyber systems. *Environment Systems and Decisions*, 33(4), 471-476.
- Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828-838. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Liu, S. (2015). Effects of control on the performance of information systems projects: The moderating role of complexity risk. *Journal of Operations Management*, 36(1), 46-62. doi:doi:10.1016/j.jom.2015.03.003
- Lo, H.-W., Liou, J. J. H., Huang, C.-N., & Chuang, Y.-C. (2019). A novel failure mode and effect analysis model for machine tool risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 173-183. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.018>
- MacAskill, K., & Guthrie, P. (2014). Multiple Interpretations of Resilience in Disaster Risk Management. *Procedia Economics and Finance*, 18, 667-674. doi:[https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00989-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00989-7)
- Makridakis, S., Hogarth, R. M., & Gaba, A. (2009). Forecasting and uncertainty in the economic and business world. *International Journal of Forecasting*, 25(4), 794-812. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2009.05.012>
- Mathwave. (2020). Extreme Value Distributions. Consulted from <http://www.mathwave.com/articles/extreme-value-distributions.html>
- Mazur, C., Hoegerle, Y., Brucoli, M., van Dam, K., Guo, M., Markides, C. N., & Shah, N. (2019). A holistic resilience framework development for rural power systems in emerging economies. *Applied Energy*, 235, 219-232. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.129>
- McKelvey, B. (2004). Toward a complexity science of entrepreneurship. *Journal of Business Venturing*, 19(3), 313-341.
- McMillan, E. (2008). *Complexity, management and the dynamics of change: Challenges for practice*: Routledge.
- Mechhoud, E.-A., Rouainia, M., & Rodriguez, M. (2016). A new tool for risk analysis and assessment in petrochemical plants. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2919-2931. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.013>
- Meloy, A. F. (2006). Arenal-type pyroclastic flows: A probabilistic event tree risk analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157(1), 121-134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.048>
- Mendonça, S., Pina e Cunha, M., Ruff, F., & Kaivo-oja, J. (2009). Venturing into the Wilderness: Preparing for Wild Cards in the Civil Aircraft and Asset-Management Industries. *Long Range Planning*, 42(1), 23-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lrp.2008.11.001>
- Meng, X., Chen, G., Shi, J., Zhu, G., & Zhu, Y. (2018). STAMP-based analysis of deepwater well control safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, 41-52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.05.019>
- Mentes, A., & Turan, O. (2018). A new resilient risk management model for Offshore Wind Turbine maintenance. *Safety Science*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.022>
- Mi, J., Li, Y.-F., Peng, W., & Huang, H.-Z. (2018). Reliability analysis of complex multi-state system with common cause failure based on evidential networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 174, 71-81. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.021>
- Miladinovic, B., & Tsokos, C. P. (2009). Ordinary, Bayes, empirical Bayes, and non-parametric reliability analysis for the modified Gumbel failure model. *Nonlinear Analysis: Theory,*

- Methods & Applications, 71(12), e1426-e1436.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.na.2009.01.181>
- Minnaar, J. R., Basson, W., & Vlok, P.-J. (2013). Quantitative methods required for implementing PAS 55 or the ISO 55000 series for asset management. *South African Journal of Industrial Engineering*, 24(3), 98-111.
- Modarres, M. (2016). *Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends*: CRC press.
- Mueller, C. E., Keil, S. I., & Bauer, C. (2019). Underground cables vs. overhead lines: Quasi-experimental evidence for the effects on public risk expectations, attitudes, and protest behavior. *Energy Policy*, 125, 456-466. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.053>
- Murakami, M., Tsubokura, M., Ono, K., & Maeda, M. (2018). New "loss of happy life expectancy" indicator and its use in risk comparison after Fukushima disaster. *Science of The Total Environment*, 615, 1527-1534. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.132>
- Nilsen, T., & Aven, T. (2003). Models and model uncertainty in the context of risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(3), 309-317.
- NIST. (2020, 06 january 2020). Extreme Wind Speeds Software: Excel. Consulted 06 january 2020
- OECD. (2011). OECD Reviews of Risk Management Policies: Future Global Shocks IMPROVING RISK GOVERNANCE-PRELIMINARY VERSION.
- Ongkowijoyo, C. S., & Doloi, H. (2018). Risk-based Resilience Assessment Model Focusing on Urban Infrastructure System Restoration. *Procedia Engineering*, 212, 1115-1122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.144>
- Ouertani, M.-Z., Parlikad, A. K., & McFarlane, D. C. (2008). Towards an approach to Select an Asset Information Management Strategy. *IJCSA*, 5(3b), 25-44.
- Paltrinieri, N., Dechy, N., Salzano, E., Wardman, M., & Cozzani, V. (2012). Lessons Learned from Toulouse and Buncefield Disasters: From Risk Analysis Failures to the Identification of Atypical Scenarios Through a Better Knowledge Management. *Risk Analysis*, 32(8), 1404-1419. doi:10.1111/j.1539-6924.2011.01749.x
- Paltrinieri, N., & Reniers, G. (2017). Dynamic risk analysis for Seveso sites. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 111-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.023>
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, 127, 259-270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>
- Panteli, M., Mancarella, P., Trakas, D. N., Kyriakides, E., & Hatziargyriou, N. D. (2017). Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(6), 4732-4742. doi:10.1109/TPWRS.2017.2664141
- Park, J., Seager, T. P., Rao, P. S. C., Convertino, M., & Linkov, I. (2013). Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Analysis*, 33(3), 356-367.
- Park, S., Park, S. I., & Lee, S.-H. (2016). Strategy on sustainable infrastructure asset management: Focus on Korea's future policy directivity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 710-722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.073>
- Parker, H., & Ameen, K. (2018). The role of resilience capabilities in shaping how firms respond to disruptions. *Journal of Business Research*, 88, 535-541. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.12.022>
- PAS-55. (2008). Specification for the Optimized Management of Physical Assets. In *Asset management*: BSI.
- Pascale, R. T. (1999). Surfing the edge of chaos. *Creative Management and Development*, 235.

- Pasman, H. J., Rogers, W. J., & Mannan, M. S. (2017). Risk assessment: What is it worth? Shall we just do away with it, or can it do a better job? *Safety Science*, 99, 140-155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.01.011>
- Paté-Cornell, E. (2012). On "Black Swans" and "Perfect Storms": Risk Analysis and Management When Statistics Are Not Enough. *Risk Analysis*, 32(11), 1823-1833. doi:10.1111/j.1539-6924.2011.01787.x
- Patriarca, R., Bergström, J., & Di Gravio, G. (2017). Defining the functional resonance analysis space: Combining Abstraction Hierarchy and FRAM. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 34-46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.032>
- Patriarca, R., Bergström, J., Di Gravio, G., & Costantino, F. (2018). Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science*, 102, 79-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.005>
- Patriarca, R., Di Gravio, G., & Costantino, F. (2017). A Monte Carlo evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to assess performance variability in complex systems. *Safety Science*, 91, 49-60. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.016>
- Patriarca, R., Di Gravio, G., Costantino, F., Falegnami, A., & Bilotta, F. (2018). An Analytic Framework to Assess Organizational Resilience. *Safety and Health at Work*, 9(3), 265-276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.10.005>
- Patriarca, R., Falegnami, A., Costantino, F., & Bilotta, F. (2018). Resilience engineering for socio-technical risk analysis: Application in neuro-surgery. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, 321-335. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.08.001>
- Peeters, J. F. W., Basten, R. J. I., & Tinga, T. (2018). Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner. *Reliability Engineering & System Safety*, 172, 36-44. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.024>
- Peiravi, A., Karbasian, M., Ardakan, M. A., & Coit, D. W. (2019). Reliability optimization of series-parallel systems with K-mixed redundancy strategy. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 17-28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.008>
- Petchrompo, S., & Parlikad, A. K. (2019). A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 181, 181-201. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.09.009>
- Piadeh, F., Ahmadi, M., & Behzadian, K. (2018). Reliability assessment for hybrid systems of advanced treatment units of industrial wastewater reuse using combined event tree and fuzzy fault tree analyses. *Journal of Cleaner Production*, 201, 958-973. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.052>
- Quigley, J., & Revie, M. (2011). Estimating the Probability of Rare Events: Addressing Zero Failure Data. *Risk Analysis*, 31(7), 1120-1132. doi:10.1111/j.1539-6924.2010.01568.x
- Raiyan, A., Das, S., & Islam, M. R. (2017). Event Tree Analysis of Marine Accidents in Bangladesh. *Procedia Engineering*, 194, 276-283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.146>
- Reid, S. (1992). Acceptable risk. *Engineering safety*, 138-166.
- Reiman, T., Rollenhagen, C., Pietikäinen, E., & Heikkilä, J. (2015). Principles of adaptive management in complex safety-critical organizations. *Safety Science*, 71, 80-92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.07.021>
- Renn, O. (1998). Three decades of risk research: accomplishments and new challenges. *Journal of Risk Research*, 1(1), 49-71.
- Rosqvist, T., & Tuominen, R. (2004). Qualification of Formal Safety Assessment: an exploratory study. *Safety Science*, 42(2), 99-120. doi:[https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00005-5)

- Ruitenburg, R. J., Braaksma, A. J. J., & van Dongen, L. A. M. (2014). A Multidisciplinary, Expert-based Approach for the Identification of Lifetime Impacts in Asset Life Cycle Management. *Procedia CIRP*, 22, 204-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.007>
- Sankararaman, S., & Mahadevan, S. (2013). Separating the contributions of variability and parameter uncertainty in probability distributions. *Reliability Engineering & System Safety*, 112, 187-199. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.11.024>
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*: Open SUNY Textbooks.
- Schweinberger, M., Petrescu-Prahova, M., & Vu, D. Q. (2014). Disaster response on September 11, 2001 through the lens of statistical network analysis. *Social Networks*, 37, 42-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.socnet.2013.12.001>
- Senthil, S., Murugananthan, K., & Ramesh, A. (2018). Analysis and prioritisation of risks in a reverse logistics network using hybrid multi-criteria decision making methods. *Journal of Cleaner Production*, 179, 716-730. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.095>
- Shah, R., McMann, O., & Borthwick, F. (2017). Challenges and prospects of applying asset management principles to highway maintenance: A case study of the UK. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 97, 231-243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.011>
- Shakou, L. M., Wybo, J.-L., Reniers, G., & Boustras, G. (2019). Developing an innovative framework for enhancing the resilience of critical infrastructure to climate change. *Safety Science*, 118, 364-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.019>
- Shen, L., Cassottana, B., & Tang, L. C. (2018). Statistical trend tests for resilience of power systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 177, 138-147. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.05.006>
- Shortridge, J., Aven, T., & Guikema, S. (2017). Risk assessment under deep uncertainty: A methodological comparison. *Reliability Engineering & System Safety*, 159, 12-23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.017>
- Sikula, N. R., Mancillas, J. W., Linkov, I., & McDonagh, J. A. (2015). Risk management is not enough: a conceptual model for resilience and adaptation-based vulnerability assessments. *Environment Systems and Decisions*, 35(2), 219-228.
- Simon-Friedt, B. R., Howard, J. L., Wilson, M. J., Gauthe, D., Bogen, D., Nguyen, D., . . . Wickliffe, J. K. (2016). Louisiana residents' self-reported lack of information following the Deepwater Horizon oil spill: Effects on seafood consumption and risk perception. *Journal of Environmental Management*, 180, 526-537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.030>
- Skogdalen, J. E., & Vinnem, J. E. (2012). Quantitative risk analysis of oil and gas drilling, using Deepwater Horizon as case study. *Reliability Engineering & System Safety*, 100, 58-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.002>
- Slagmulder, R., & Devoldere, B. (2018). Transforming under deep uncertainty: A strategic perspective on risk management. *Business Horizons*, 61(5), 733-743. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.05.001>
- Sornette, D. (2009). Dragon-kings, black swans, and the prediction of crises. *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2(1), 1-18.
- Spatari, S., & Aktan, A. E. (2013). Asset management in civil engineering. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(4), 295-296. doi:10.1080/15732479.2012.654945
- Stace, W. T., & Goldstein, J. A. (2006). Novelty, indeterminism and emergence. *Complexity & Organization*, 8(2), 77-95.

- Straub, D., Papaioannou, I., & Betz, W. (2016). Bayesian analysis of rare events. *Journal of Computational Physics*, 314, 538-556. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.03.018>
- Sun, Y., Fidge, C., & Ma, L. (2008). A generic split process model for asset management decision-making. Paper presented at the Proceedings of the 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems. Beijing, China.
- Taleb, N. N. (2007). *The black swan: The impact of the highly improbable* (Vol. 2): Random house.
- Tomaszewski, M., & Ruszczak, B. (2013). Analysis of frequency of occurrence of weather conditions favouring wet snow adhesion and accretion on overhead power lines in Poland. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 102-108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.08.007>
- Van Der Merwe, S. E., Biggs, R., & Preiser, R. (2018). A framework for conceptualizing and assessing the resilience of essential services produced by socio-technical systems. *Ecology and Society*, 23(2).
- Vaurio, J. K. (2011). Importance measures in risk-informed decision making: Ranking, optimisation and configuration control. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1426-1436. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.012>
- Vileiniskis, M., & Remenyte-Prescott, R. (2017). Quantitative risk prognostics framework based on Petri Net and Bow-Tie models. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 62-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.026>
- Walton, M. (2014). Applying complexity theory: A review to inform evaluation design. *Evaluation and Program Planning*, 45, 119-126. doi:<https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2014.04.002>
- Watson, J.-P., Guttromson, R., Silva-Monroy, C., Jeffers, R., Jones, K., Ellison, J., . . . Corbet, T. (2014). Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity oil and gas sectors in the United States. *Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (United States), Tech. Rep.*
- Xia, N., Zou, P. X. W., Griffin, M. A., Wang, X., & Zhong, R. (2018). Towards integrating construction risk management and stakeholder management: A systematic literature review and future research agendas. *International Journal of Project Management*, 36(5), 701-715. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.03.006>
- Xia, Y., Xiong, Z., Dong, X., & Lu, H. (2017). Risk assessment and decision-making under uncertainty in tunnel and underground engineering. *Entropy*, 19(10), 549.
- Xu, X., Chen, A., Jansuwan, S., Yang, C., & Ryu, S. (2018). Transportation network redundancy: Complementary measures and computational methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, 114, 68-85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.014>
- Yamaguchi, I., & Kunugita, N. (2018). Fukushima Nuclear Disaster—Monitoring and Risk Assessment. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*: Elsevier.
- Yang, M., Khan, F., Lye, L., & Amyotte, P. (2015). Risk assessment of rare events. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 102-108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.004>
- Yang, X., & Haugen, S. (2018). Implications from major accident causation theories to activity-related risk analysis. *Safety Science*, 101, 121-134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.020>
- Yazdandoost, F., & Izadi, A. (2018). An asset management approach to optimize water meter replacement. *Environmental Modelling & Software*, 104, 270-281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.015>

- Yazdi, M., & Kabir, S. (2017). A fuzzy Bayesian network approach for risk analysis in process industries. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 507-519. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.015>
- Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., & Baghery, M. (2018). HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: A study of automotive parts industry in Iran. *Safety Science*, 102, 144-158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.015>
- Yuan, H., Zhang, W., Zhu, J., & Bagtzoglou, A. C. (2018). Resilience Assessment of Overhead Power Distribution Systems under Strong Winds for Hardening Prioritization. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4(4), 04018037.
- Yue, S. (2000). The Gumbel logistic model for representing a multivariate storm event. *Advances in Water Resources*, 24(2), 179-185. doi:[https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00039-7)
- Zamuda, C. D., Larsen, P. H., Collins, M. T., Bieler, S., Schellenberg, J., & Hees, S. (2019). Monetization methods for evaluating investments in electricity system resilience to extreme weather and climate change. *The Electricity Journal*, 32(9), 106641. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106641>
- Zamuda, C. D., Wall, T., Guzowski, L., Bergerson, J., Ford, J., Lewis, L. P., . . . DeRosa, S. (2019). Resilience management practices for electric utilities and extreme weather. *The Electricity Journal*, 32(9), 106642. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106642>
- Zeng, Z., & Zio, E. (2017). An integrated modeling framework for quantitative business continuity assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 106, 76-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.12.002>
- Zhang, L., Skibniewski, M. J., Wu, X., Chen, Y., & Deng, Q. (2014). A probabilistic approach for safety risk analysis in metro construction. *Safety Science*, 63, 8-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.10.016>
- Zheng, L., & Sayed, T. (2019). A full Bayes approach for traffic conflict-based before-after safety evaluation using extreme value theory. *Accident Analysis & Prevention*, 131, 308-315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.07.014>
- Zimmerman, B., Lindberg, C., & Plsek, P. (1998). A complexity science primer: What is complexity science and why should I learn about it. *Adapted From: Edgeware: Lessons From Complexity Science for Health Care Leaders*, Dallas, TX: VHA Inc.
- Zio, E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 125-141. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.06.002>
- 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. (2018). The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 177, 176-190. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.020>
- Zio, E., & Aven, T. (2011). Uncertainties in smart grids behavior and modeling: What are the risks and vulnerabilities? How to analyze them? *Energy Policy*, 39(10), 6308-6320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.030>
- Zio, E., & Aven, T. (2013). Industrial disasters: Extreme events, extremely rare. Some reflections on the treatment of uncertainties in the assessment of the associated risks. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(1), 31-45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.01.004>
- Zobel, C. W. (2011). Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience. *Decision Support Systems*, 50(2), 394-403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.10.001>